

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

16+
ISSN 2071-6168

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 7

**Тула
Издательство ТулГУ
2018**

Председатель

Грязев М.В., д-р техн. наук, проф., ректор Тульского государственного университета.

Заместитель председателя

Кухарь В.Д., д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе.

Ответственный секретарь

Ивутин А.Н., канд. техн. наук, доц., начальник Управления научно-исследовательских работ.

Главный редактор

Прейс В.В., д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук, проф., –

отв. редактор серии «Гуманитарные науки»;

Берестнев М.А., канд. юрид. наук, доц., –

отв. редактор серии «Экономические и юридические науки». Часть 2. «Юридические науки»;

Борискин О.И., д-р техн. наук, проф., –

отв. редактор серии «Технические науки»;

Егоров В.Н., канд. пед. наук, доц., –

отв. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;

Заславская О.В., д-р пед. наук, проф., –

отв. редактор серии «Педагогика»;

Качурин Н.М., д-р техн. наук, проф., –

отв. редактор серии «Науки о Земле»;

Понаморева О.Н., д-р хим. наук, доц., –

отв. редактор серии «Естественные науки»;

Сабинина А.Л., д-р экон. наук, доц., –

отв. редактор серии «Экономические и юридические науки». Часть 1. «Экономические науки».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор

Борискин О.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Заместитель ответственного редактора

Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь

Яковлев Б.С., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Члены редакционной коллегии:

Александров А.Ю., д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров);

Баласанян Б.С., д-р техн. наук (Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван, Армения);

Васин С.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Дмитриев А.М., д-р техн. наук (Московский государственный технический университет «СТАНКИН», г. Москва);

Запомель Я., д-р техн. наук (Технический университет Остравы, г. Острава, Чехия);

Ковалев Р.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Колтунович Т.Н., д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, г. Люблин, Польша);

Кристалль М.Г., д-р техн. наук (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград);

Ларкин Е.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Мельников В.Е., д-р техн. наук (Национальный исследовательский университет «МАИ», г. Москва);

Мещеряков В.Н., д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет, г. Липецк);

Мозжечков В.А., д-р техн. наук

(АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);

Распопов В.Я., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Савин Л.А., д-р техн. наук (Орловский государственный технический университет, г. Орел);

Семилет В.В., д-р техн. наук (АО «Конструкторское бюро приборостроения», г. Тула);

Сорокин П.А., д-р техн. наук (Российский университет транспорта «МИИТ», г. Москва);

Степанов В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Сычужов А.А., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Трегубов В.И., д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ», г. Тула);

Чуков А.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Яцун С.Ф., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-611104 от 19 марта 2015 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.91

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

А.В. Анцев, Данг Х.Ч.

В современном машиностроении традиционно при решении задачи оценки периода стойкости режущего инструмента используют стойкостные зависимости, описывающие лишь зависимость среднего периода стойкости режущего инструмента от режимов резания. Однако стойкостные зависимости носят теоретический (идеальный) характер, и не учитывают случайную природу процесса резания. Для решения задачи повышения точности прогнозирования периода стойкости режущего инструмента, авторы предлагают конструкцию устройства измерения вибрации, которая появляется в процессе фрезерования, путем измерения вибрации оправки инструмента.

Ключевые слова: период стойкости, износ, вибрация, устройство измерения вибрации, фрезерование.

Точность прогнозирования периода стойкости применяемого режущего инструмента влияет на эффективность современного машиностроения. Непредвиденный выход инструмента из строя приводит к большим издержкам производства из-за увеличения затрат на профилактику и обслуживание режущего инструмента и увеличения затрат на исправимый и неисправимый брак из-за высокой стоимости заготовок на финишных операциях. Для снижения вероятности непредвиденного выхода инструмента из строя технологи машиностроительных предприятий занижают режимы резания до 40 % от рекомендуемых и принудительно меняют режущий инструмент, имеющий значительный запас стойкости, что негативно влияет на производительность и стоимость производства изделий машиностроения. Несмотря на экономическую важность операции резания металлов, процесс обработки резанием остается одним из наименее изученных в связи с постоянным появлением новых инструментальных и конструкцион-

ных материалов, что подтверждается крайне низкой точностью прогнозирования периода стойкости режущего инструмента и его остаточной стойкости [1]. Это связано с тем, что физика процесса изнашивания довольно сложна и период стойкости как наработка инструмента до отказа является случайной величиной, зависящей от множества факторов: параметров режима резания, свойств обрабатываемого материала, припуска на обработку, геометрии и материала режущей части инструмента и других факторов [2, 3].

При этом, несмотря на широкие возможности современных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), прямая оценка линейных размеров износа режущего инструмента затруднена, поэтому используют другие характеристики процесса резания, которые могут быть использованы для косвенного контроля износа и разрушения режущего инструмента [4]. Одной из таких характеристик является вибрация системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) [5].

Источником вибрации из зоны резания являются процессы трения и деформирования. Вибрация представляет собой упругую энергию, мгновенно высвобождающуюся в материале при разрушении. Эти процессы генерируют упругие волны, распространяющиеся по инструменту, обрабатываемой детали и деталям станка. Изменение в характере протекания процессов резания вызывают изменение параметров сигналов вибрации. Причиной этого может быть нарушение образования и схода стружки, а также увеличение контактных площадок на рабочих поверхностях инструмента в связи с его изнашиванием. Высокочастотные колебания вибрации позволяют регистрировать в инструментальном материале процесс трещинообразования, который является предвестником разрушения режущей части инструмента [6].

Процесс износа режущего инструмента имеет три стадии, влияющие на уровень вибрации (рис. 1).

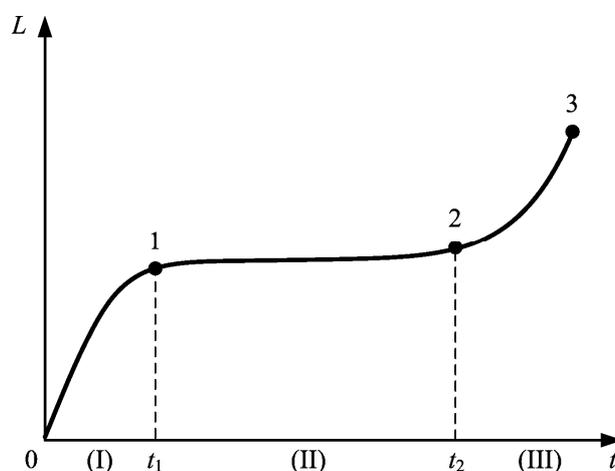


Рис. 1. Процесс износа режущего инструмента

Стадия (I) показывает процесс приработки нового инструмента. В этот момент происходит интенсивный износ лезвия режущего инструмента до определенного уровня. Достигнув данный уровень износа в момент времени, износ режущего инструмента переходит в стадию (II) – стадию установившегося процесса износа. В конце срока своей службы в момент времени износ режущего инструмента переходит в стадию (III) – стадию катастрофического износа.

Вибрация режущего инструмента меняется при прохождении данных стадий следующим образом (рис. 2).

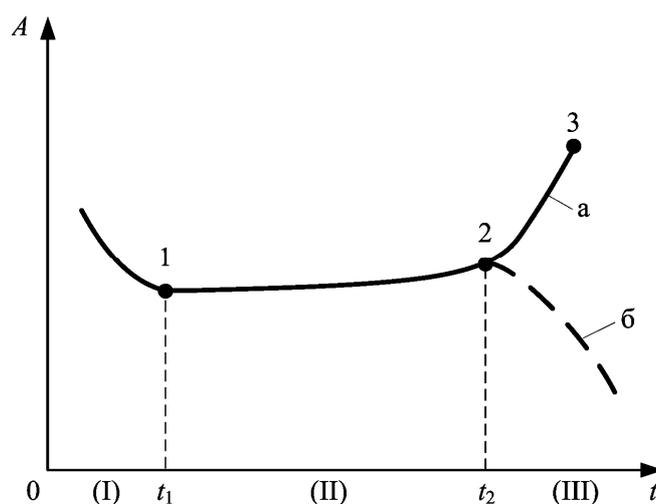


Рис. 2. Изменение уровня вибрации по мере износа режущего инструмента

Во время приработки режущего инструмента первоначальный уровень вибрации снижается до минимального значения в точке t_1 . По мере стабильного износа уровень вибрации увеличивается с небольшой скоростью. При переходе в стадию катастрофического износа уровень вибрации начинает резко возрастать (ветвь а, рис. 2). Так же возможен вариант с разрушением режущей кромки что приведет к резкому снижению уровня вибрации (ветвь б, рис. 2).

Для определения входного параметра амплитуды автоколебаний, необходимо создание специального устройства. Одним из методов контроля вибрации при фрезеровании является оптический метод, основанный на явлении интерференции. Данный метод подразумевает использование голографического дифференциального интерферометра, учитывающего разность двух параллельных векторов скорости в отдельных точках вращающегося объекта [7, 8]. Достоинством данной методики является: бесконтактность измерений; возможность регистрации общей картины поля перемещений и измерения величины и направления перемещения в выбранной точки поверхности объекта; высокая чувствительность к переме-

щениям, оцениваемая длиной волны света. Несмотря на простую конструкцию, данный метод имеет ряд недостатков. Во-первых, в связи с прямым гетеродинированием, отраженные лучи должны иметь достаточную интенсивность для создания полезного сигнала на выходе интерферометра. Это приводит к необходимости создания светоотражающего покрытия на исследуемой поверхности, которое не подходит для металлообработки. Во-вторых, прием угловых колебаний возможен только, если скорость вращения превышает определенное значение. В-третьих, данный метод не обеспечивает указание направления вибрации. В-четвертых, сложность и высокая стоимость оборудования, жесткие требования к состоянию атмосферы (влажность, отсутствие конденсата и запыленности и т.п.), к качеству и к температуре поверхности исследуемого объекта.

Другим распространенным методом для определения вибрации на фрезерных станках является использование акселерометров. К достоинствам акселерометров можно отнести их невысокую стоимость относительно простого устройства, которое обеспечивает надёжность и устойчивость к внешним воздействиям. Однако, при установке этого датчика необходимо учитывать, что акселерометр должен быть расположен максимально близко к зоне резания, например, в оправке инструмента, чтобы измерить сигналы вибрации так как при прохождении сигнала вибрации через стык упругой системы станка «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) происходит существенное ослабление сигнала [9]. Данное обстоятельство делает необходимым разработку специальных устройств (СУ) контроля вибрации в процессе фрезерования, к которым предъявляются следующие требования:

- 1) датчик устройства должен быть расположен максимально близко к зоне резания;
- 2) части устройства не должны препятствовать работе системы смены инструмента и системы охлаждения жидкости станка во время процесса обработки;
- 3) конструкция устройства должна обеспечивать быстрое операционное измерение;
- 4) устройство должно быть подходящим для многих типов популярных в машиностроении фрезерных станков.

Предложенное СУ состоит из двух основных частей: механической структура и системы обработки сигналов.

Механическая структура выполнит измерение амплитуды и частоты вибрации оправки с помощью акселерометров и системы обработки сигналов. Предлагается два варианта механической структуры контроля вибрации для удовлетворения указанных выше требований.

Вариант 1 (МСВ1) фиксируется на фрезерном шпинделе в соответствии со следующей схемой (рис. 3, 4).

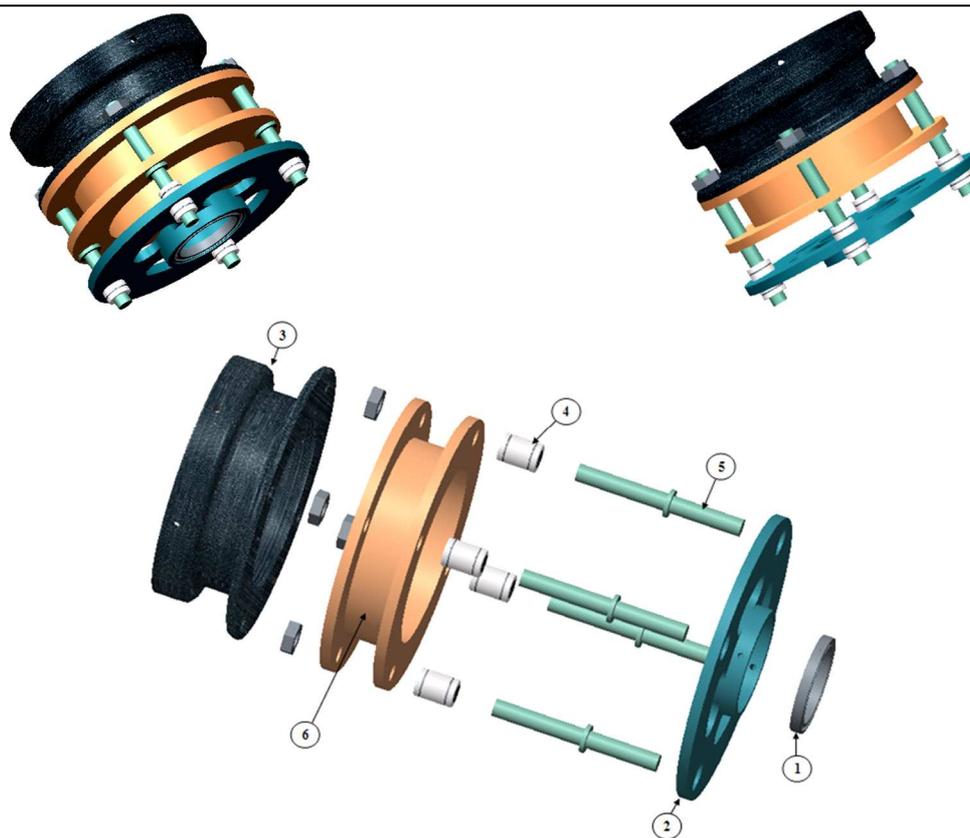


Рис. 3. Трехмерная модель МСВ1 для измерения вибрации шпиндельной группы:
1 – подшипник качения; 2 – держатель подшипника; 3 – резинка;
4 – линейный подшипник; 5 – стержень с резьбой;
6 – неподвижный стол

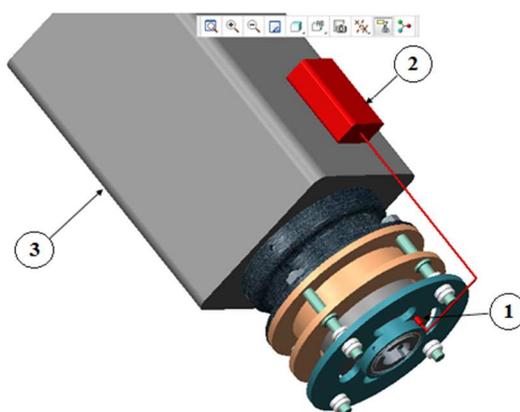


Рис. 4. МСВ1 для измерения вибрации шпиндельной группы на фрезерном станке:
1 – трехосевой акселерометр; 2 – усилитель сигнала;
3 – шпиндель фрезерного станка

Устройство работает следующим образом: вибрирующий шпиндель передает вибрацию на подшипник качения (1), подшипник качения передает вибрацию на держатель подшипника (2), к которому крепится трех-

севой акселерометр. Трехосевой акселерометр получает горизонтальную вибрацию с помощью резинки (3). Вертикальная вибрация получается с помощью держателя подшипника и передается по вертикальной оси с помощью линейного подшипника (4).

Достоинством данной механической структуры является непрерывный контроль вибрации и отсутствие препятствий работе систем станка. Однако, данная структура имеет следующий недостаток: измерение вибрации на разных типах фрезерных станков невозможно, поскольку форма шпинделя каждого станка отличается.

Для преодоления указанного недостатка предлагается второй вариант устройства механической структуры в виде руки-робота с тремя степенями свободы (МСВ2) (рис. 5).

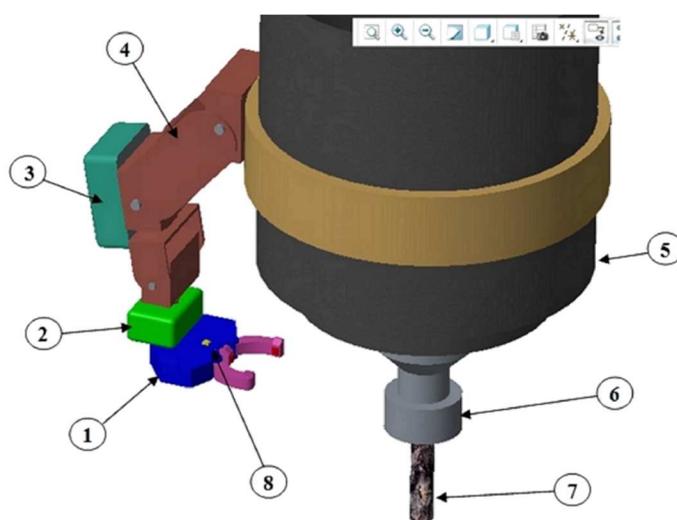


Рис. 5. МСВ2 для измерения вибрации оправки на фрезерном станке:
1 – захватный рычаг; 2 – механизм с тремя степенями свободы;
3 – усилитель сигнала; 4 – рука-робот с тремя степенями свободы;
5 – шпиндель фрезерного станка; 6 – оправка;
7 – режущий инструмент; 8 – трехосевой акселерометр

Структура механизма с тремя степенями свободы (2) позволяет держать захватные рычаги и одновременно двигаться по трем направлениям: OX, OY, OZ системы координат OXYZ. Кроме того, структура механизма с тремя степенями свободы помогает муфте соединять руки-робота с захватными рычагами не разрушаясь под воздействием вибрации оправки.

Прибор работает следующим образом: вибрирующая оправка, передает вибрацию на ролик (9) (рис. 6), ролик передает вибрацию на захватные рычаги (10), к которым крепится трехосевой акселерометр (8). С помощью трехосевого акселерометра происходит измерение сигнала вибрации по трем осям.

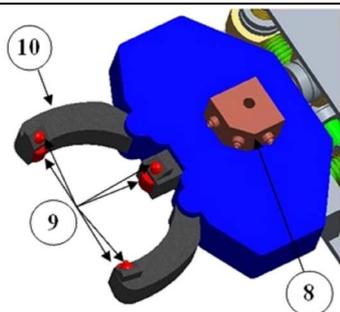


Рис. 6. Захватный рычаг:
8 – трехосевой акселерометр;
9 – ролик; 10 – рычаг

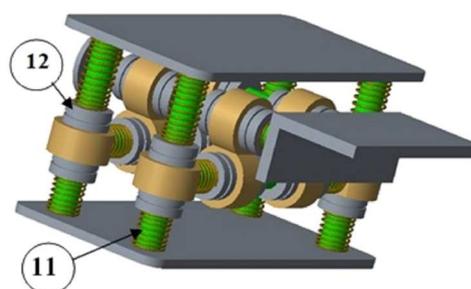


Рис. 7. Структура механизма с тремя степенями свободы:
11 – пружина; 12 – линейный подшипник

Система обработки сигналов состоит из следующих компонентов: трехосевой акселерометр, модуль усилителя сигнала, радио-модуль, аналого-цифровой преобразователь, персональный компьютер (рис. 8).

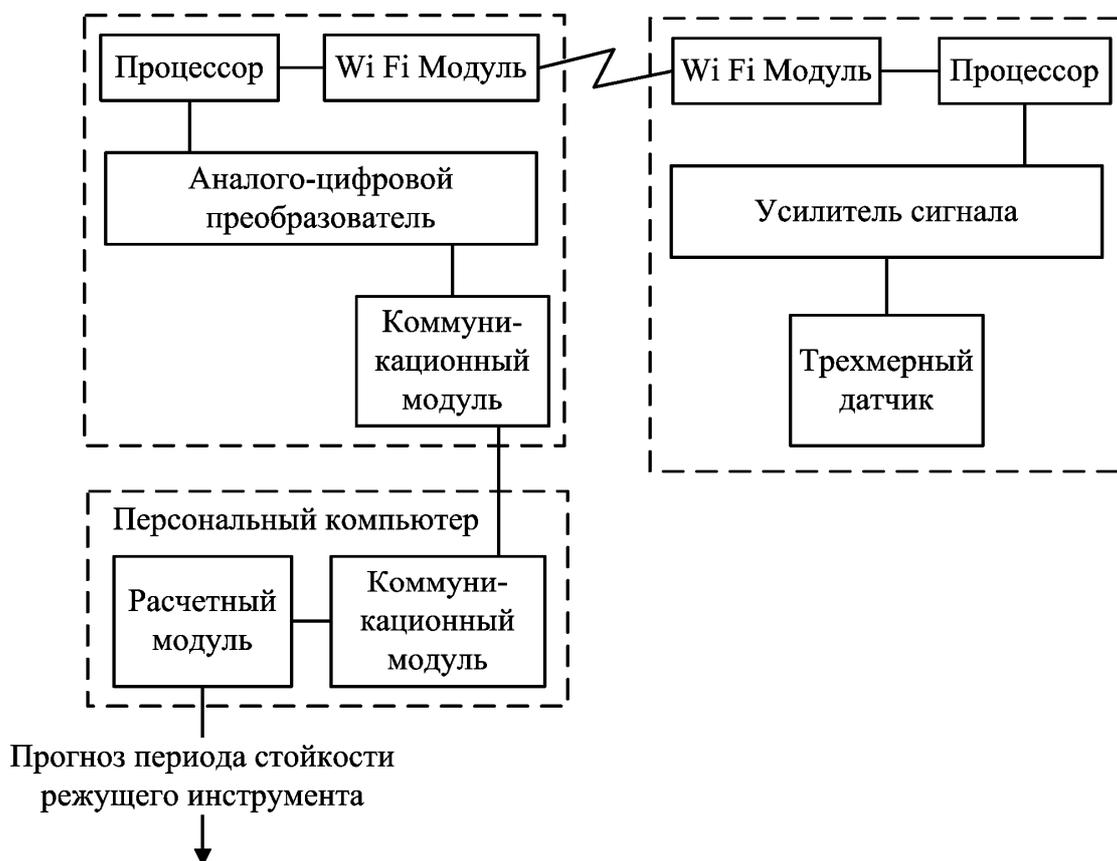


Рис. 8. Схема системы обработки сигналов

Трехосевой акселерометр получает сигналы вибрации оправки опосредованно с помощью захватных рычагов. Данные с датчиков усиливаются на месте с помощью модуля усилителя сигнала. Полученная информация с помощью радиосвязи передается на аналого-цифровой преобразова-

тель, который оцифровывает сигналы вибрации оправки и передает ее на персональный компьютер с установленным программным обеспечением для анализа полученной информации.

Изучение зависимости вибрации в процессе резания и создание устройства контроля вибрации на данный момент является актуальной задачей, а ее решение позволит повысить эффективность металлообработки за счет:

1. снижения главного технологического времени, требуемого на выполнение операций на металлообрабатывающем оборудовании;
2. снижения количество брака, связанного с отказом режущего инструмента во время обработки;
3. уменьшение вспомогательного времени, необходимое на обслуживание и замену режущего инструмента;
4. уменьшение затрат на инструментальное обеспечение за счет его более рационального применения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00849.

Список литературы

1. Астахов В.П. Принцип наименьшей энергии пластической деформации при разрушении как основа понимания и оптимизации обработки металлов резанием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч. 1. С. 141-153.
2. Пасько Н.И., Анцев А.В., Анцева Н.В., Сальников С.В. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 174 с.
3. Pasko N.I., Antsev A.V., Antseva N.V., Fyodorov V.P. The generalized mathematical model of the failure of the cutting tool // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (2017) 012052.
4. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др.; под. ред. С.Н. Григорьева. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
5. Анцев А.В., Данг Х.Ч., Жаднов А.В. Автоматизированная система контроля износа режущего инструмента по уровню вибрации // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Сб. научных трудов междунар. заочной научно-техн. конф. «АПИР-22», 9-10 ноября 2017 года; под ред. В.В. Прейса, Д.А. Провоторова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 182-186.
6. Пат. 2417140 Рос. Федерация: МПК В23В 25/06, В23Q 17/09. Устройство контроля износа и прогнозирования остаточной стойкости режущего инструмента для системы ЧПУ станка [Текст] / Мартинов Г.М., Синопальников В.А., Григорьев А.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ

ВПО Московский Государственный Технологический Университет "Станкин". № 2009141506; заявл. 11.11.2009; опубл. 27.04.2011, Бюл. № 12. 15 с.

7. N.A. Halliwell. Measurement of oscillatory and vibrational motion // European Patent Specification, 1983.

8. Andrew C. Lewin, Volkmar Roth, Georg Siegmund. Measurement of rotational vibrations using a novel interferometric technique // Measurement. 1995. Vol. 16. Issue 2. P. 81-90.

9. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатывающего центра в режиме фрезерования // Системы. Методы. Технологии. 2014. №1. Братск: Братский государственный университет. С. 96-101.

Анцев Александр Витальевич, канд. техн. наук, доцент, a.antsev@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Данг Хыу Чонг, аспирант, danghuutrong@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

TOOL LIFE PREDICTION BY VIBRATION MEASUREMENT DURING MILLING

A.V. Antsev, H.T. Dang

In modern manufacturing engineering, traditionally in the solution of the problem of estimating of cutting tool life is used the tool life equations, which describe only the dependence of the average period of tool life on the cutting regimes. However, the wear dependencies of a cutting tool have theoretical (ideal) form and do not consider the stochastic nature of tool wear. In order to solve the problem of increasing accuracy of tool life prediction of a cutting tool, the authors offered the design of a vibration measuring device to measure the vibration of tool holder that appears during milling.

Key words: tool life, tool wear, vibration, vibration measuring device, milling.

Antsev Alexander Vitalyievich, candidate of technical science, docent, a.antsev@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Dang Huu Trong, postgraduate, danghuutrong@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЗУБООБРАБОТКИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ ЗА РУБЕЖОМ

Е.С. Янов, М.В. Полев, А.В. Анцев

Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями развития зубообработки в европейских странах. Проведен анализ выпускаемой продукции крупнейших компаний Gleason и Fette, а также тенденции их развития. Приведен краткий сравнительный анализ монолитных и составных фрез.

Ключевые слова: монолитная червячная фреза, составная червячная фреза, станок, тенденция, конструкция, зубообработка, зубофрезерование.

Несмотря на нестабильность мировой экономики, машиностроение является одной из ведущих отраслей и спрос на ее продукцию растет как в гражданском, так и в военном секторе, что требует увеличения выпуска продукции, в состав которой входят различные зубчатые передачи. Благодаря данному факту спрос на зубчатые колеса малых размеров постоянно повышается. Кроме того, спрос растет и на крупногабаритные зубчатые колеса, потребность в которых в основном связана с развитием сектора тяжелого машиностроения и ветровой энергетики. Диаметры зубчатых колес варьируются от нескольких десятков миллиметров (для коробок передач автомобилей, приводов двигателей и т.д.) до десятков тысяч миллиметров (приводы поворотов кранов, ветрогенераторов и артиллерийских башен).

В зависимости от объема выпуска деталей с зубчатым профилем, требований к ним и организационно-технического состояния производственных мощностей предприятия получение зубчатого профиля возможно методами резания, пластического деформирования, литья или комбинацией этих методов. При этом процессы формообразования зубчатого венца резанием независимо от характера производства остаются основными. При таких условиях производства, режущий инструмент должен обладать универсальностью и многофункциональностью. Таким требованиям отвечают червячные фрезы, которые должны выполнять одновременно несколько задач для сокращения машинного времени обработки и повышения эффективности производства. К ним можно отнести черновую и чистовую обработку с помощью одного инструмента, что позволяет полностью отказаться от процесса шлифовки на шлифовальном станке. Еще одним примером является выполнение двух операций, таких как нарезание зубьев и снятие фаски, с одного установка в патроне. Соответственно, стоит отметить, что конструкции червячных фрез бывают: монолитные со шлифованным профилем, сборные с поворотными вставными рейками, монолитные затылованные с нешлифованным профилем повышенной точности и твердосплавные червячные фрезы.

Расширение объемов выпуска однотипной, но многовариантной продукции машиностроения, к которой относятся и детали с зубчатым профилем, предусматривает, с одной стороны, повышение универсальности оборудования и систем управления для быстрого перехода на изготовление нового варианта зубчатой детали, а с другой стороны, комплексную автоматизацию производства. Но при этом основная задача – снижение себестоимости производства зубчатых колес.

Из-за постоянно возрастающих требований к точности колес, их сроку службы и уровня шумности растут также и требования к качеству боковых поверхностей и размерной точности, а, следовательно, и к точности зуборезного инструмента.

Есть мнение, что единственно верный выбор в данном случае – это составные червячные фрезы с твердосплавными пластинами [1]. Но это не совсем так, потому что требования к точности профиля при использовании червячных фрез выше по сравнению с такими видами обработки, как сверление, точение или фрезерование. Соответственно, такой инструмент можно использовать только на черновых операциях. В настоящее время широкое применение составные фрезы получили в единичном и мелкосерийном производстве крупногабаритных и крупномодульных колес [1, 2, 3]. Рабочий диапазон составных червячных фрез пластинами ограничен черновой обработкой (класс В), однако в настоящее время наблюдаются тенденции использования такого инструмента и для получистовой обработки [1].

В то же время в средне- и крупносерийном производстве зубчатых колес используют червячные фрезы из быстрорежущей стали и твердых сплавов. Стоит отметить, что современные монолитные червячные фрезы раскрывают весь свой потенциал при использовании в массовом производстве, например, в автомобилестроении [4]. Основное преимущество монолитных червячных фрез – высокая точность инструмента, что напрямую сказывается на качестве продукции, так как монолитные фрезы лишены погрешностей, возникающих при сборке составных и сборных фрез, соответственно профиль зубчатого колеса вырезается с высокой точностью по всей длине режущей кромки. Таким образом, монолитные червячные фрезы можно изготовить с классом точности ААА, а они соответственно обеспечивают чистовую обработку колес при чистовой обработке 4-5 степени точности [5]. К недостаткам монолитных фрез можно отнести меньший период стойкости инструмента и меньшие режимы обработки по сравнению со сборными или составными фрезами.

Передовыми производителями и разработчиками червячных фрез являются фирмы Klingelberg, Fette, Saazor (Германия), Iscar (Израиль), Samputensile (Италия), Deltal (Франция) [6], хотя, пожалуй, самая известная из них, это корпорация Gleason, включающая в себя компании производящие как зуборезный инструмент, так и зубообрабатывающие станки [3]. Рассмотреть всех производителей, в рамках формата одной статьи, не

представляется возможным, поэтому рассмотрим направления развития продукции лидирующих компаний на рынке. Gleason, Fette и Iscar предлагают следующую гамму зуборезного инструмента (рис. 1):

- монолитные червячные фрезы из порошковой быстрорежущей стали с упрочняющими покрытиями для черновой и чистовой обработки;
- монолитные твердосплавные фрезы;
- составные червячные фрезы с поворотными рейками;
- червячные фрезы со сменными твердосплавными пластинками;
- комбинированный режущий инструмент, сочетающий на одной оправке инструмент для выполнения нескольких задач.

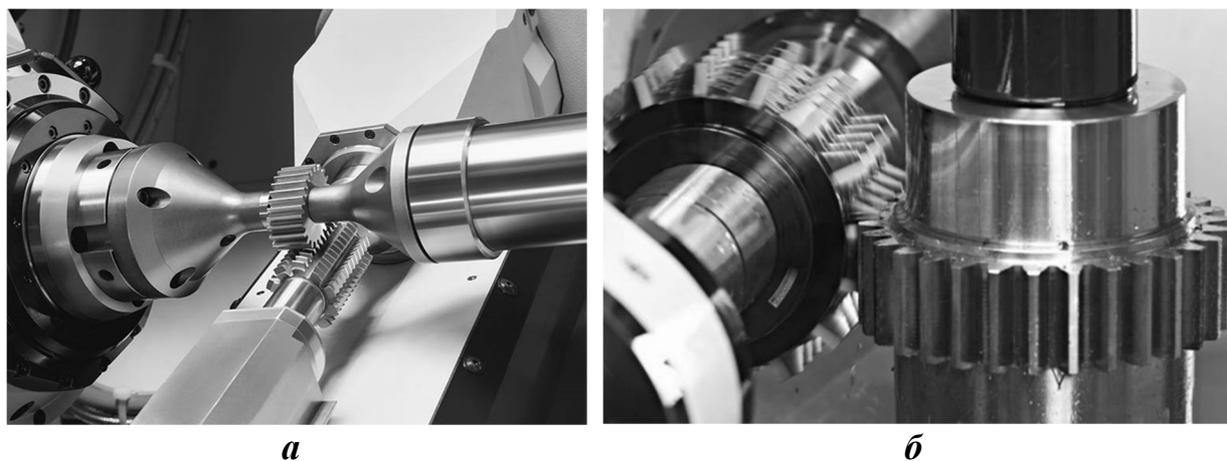


Рис. 1. Зубофрезерование цилиндрических зубчатых колес:
а – монолитной быстрорежущей червячной фрезой;
б – червячной фрезой с твердосплавными пластинками

После зубофрезерования зубчатые колеса подвергаются финишной обработке, например, шлифуются и фрезеруются фаски. Современный зуборезный инструмент вышеупомянутой компании Fette позволяет объединить зубофрезерование и снятие фасок в один процесс. Инструменты для зубофрезерования и снятия фасок крепятся рядом на одной оправке. Как только вырезается новый зуб, в действие вступают два рабочих органа CHAMFER-CUT: один снимает фаску в верхней части, а другой выполняет аналогичную операцию в нижней. В результате получается зубчатое колесо со снятыми фасками, не требующее дальнейшей обработки (рис. 2) [5].

В процессе зубофрезерования червячные фрезы испытывают значительные механические и термические нагрузки. Тенденции механической обработки без использования СОЖ ведут к еще большему увеличению термических нагрузок на инструмент при изготовлении зубчатых колес [7].

Кроме того, режущие кромки инструментов испытывают напряжения, связанные с прерывистым резанием, поэтому рассматриваемые производители предлагают использовать новое PVD-покрытие LMT Nanosphere, предназначенное для работы именно в таких условиях [5]. По данным

компании Fette [2, 5], покрытие Nanosphere обеспечивает увеличение срока службы инструмента на 30 % по сравнению с традиционными покрытиями, используемыми в отрасли, например, нитридом титана TiN. Применяемая технология позволяет получить многослойное наноструктурированное строение покрытия. Многослойность обеспечивает превосходную теплоизоляцию и улучшенную эластичность покрытия [2].

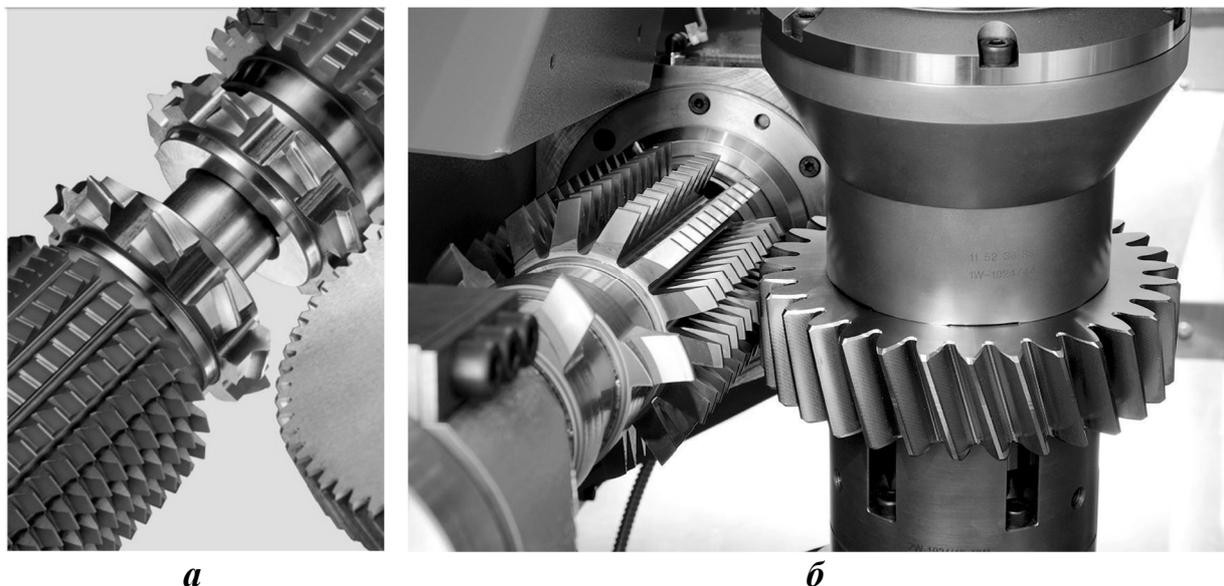


Рис. 2. Инструменты для зубофрезерования и снятия фасок:
а – для прямозубых цилиндрических колес;
б – для косозубых цилиндрических колес

Сегодня при производстве зубчатых колес, особенно в крупносерийном и массовом производстве, эффективность оценивается не только на основе результатов фрезерования в течение срока службы инструмента, но также с учетом всего жизненного цикла. Т.е. необходимо принимать во внимание производительность и затраты в течение срока жизни инструмента. В плане затрат явное преимущество отдать цельным фрезам нельзя, хотя их можно перетачивать и обновлять покрытие без ущерба для производительности, они имеют меньший ресурс на переточку. В случае сборных инструментов в конце срока службы инструмента все вставные режущие пластины заменяются на новые с сохранением исходного корпуса инструмента, также сборные инструменты имеют больший ресурс на переточку. При этом инструмент со сменными режущими пластинами может развивать большую скорость резания по сравнению с монолитным инструментом.

Что касается тенденций развития зубообработки, то они в целом придерживаются мировых тенденций развития станкостроения. Повышение производительности зубофрезерования обеспечивается за счет высоко-

скоростной обработки при сухом резании. И здесь стоит отметить вышеупомянутую компанию Gleason [3]. Основным направлением развития является модульный принцип, позволяющий создавать компоновки с базовыми элементами для станков различного назначения. Наибольшее распространение среди зубообрабатывающего оборудования получили зубофрезерные станки с ЧПУ. С каждым годом увеличивается скорость вращения инструмента и заготовок, приводы становятся компактнее и мощнее. На рынке появились комбинированные станки, сочетающие в себе обработку червячными фрезами и токарно-сверлильные операции или обработку червячными фрезами и шлифование профильным кругом, выполняющие смену инструмента в автоматическом режиме (рис. 3).



Рис. 3. Импортные зубофрезерные станки:

а – комбинированный станок с ЧПУ сочетающий зубофрезерование и токарную обработку; б – комбинированный станок с ЧПУ сочетающий зубофрезерование и зубошлифование

Расширение объемов выпуска однотипной, но многовариантной продукции машиностроения, к которой относятся и детали с зубчатым профилем, предусматривает, с одной стороны, повышение универсальности оборудования и систем управления для быстрого перехода на изготовление нового варианта зубчатой детали, а с другой стороны, комплексную автоматизацию производства. В настоящее время это связано с применением технологического оборудования с ЧПУ и ЭВМ на различных уровнях управления.

Одной из важнейших тенденций развития является повышение эффективности нарезания зубчатых колес, за счет комплексного усовершенствования, как самих червячных фрез, так и зуборезных станков. Передовые разработки крупнейших зарубежных производителей зуборезного ин-

струмента направлены на внедрение комбинированного инструмента с многослойным упрочняющим покрытием, при обработке без использования СОЖ на модульном оборудовании с ЧПУ.

Список литературы

1. Заякин С. Зубообрабатывающие технологии // МирПром [Электронный ресурс]. URL: <http://mirprom.ru/public/zuboobrabatyvayushchie-tehnologii.html> (дата обращения 25.06.2018).

2. News from Fette Compacting // Fette Compacting [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fette-compacting.com/en/news/> (дата обращения 25.06.2018).

3. Мировой лидер производства зубчатых колес // Gleason [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gleason.com/cms/ru/> (дата обращения 25.06.2018).

4. Overview // Fette Compacting [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fette-compacting.com/en/products/overview/> (дата обращения 25.06.2018).

5. Lmt Tool. Прецизионный инструмент // Компания "ИНТЕРТУЛМАШ" [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itmash.ru/ftpgetfile.php?id=296&module=files> (дата обращения 25.06.2018).

6. The LMT Group. Efficiency through Innovation // Lmt Group [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lmt-group.de/en/> (дата обращения 25.06.2018).

7. Феофилов Н.Д., Янов Е.С. Влияние силы резания на прочность и стойкость инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 10. С. 92-99.

Янов Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий специалист отдела техперевооружения и технологического аудита, dexaik@mail.ru, Россия, Тула, АО «НПО «Сплав»,

Полев Максим Владиславович, заместитель генерального директора, info@itm-info.ru, Россия, Москва, ООО ИТМ Групп К,

Анцев Александр Витальевич, канд. техн. наук, доцент, a.antsev@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DEVELOPMENT TRENDS OF WORM MILL CUTTING ABROAD

E.S. Yanov, M.V. Polev, A.V. Antsev

The questions connected with the peculiarities of development of gear processing in European countries are considered. The analysis of the output of the largest companies as Gleason and Fette, as well as the trends of their development is carried out. A brief comparative analysis of monolithic and composite mills is given.

Key words: monolithic worm mill, compound worm mill, machine, trend, construction, gearing, gear milling.

Yanov Evgeny Sergeevich, candidate of technical science, leading specialist of technical re-equipment and technological audit department, dexaik@mail.ru, Russia, Tula, JSC "NPO "SPLAV",

Polev Maxim Vladislavovich, vice director, info@itm-info.ru, Russia, Moscow, ITM Group K LLC,

Antsev Alexander Vitalyievich, candidate of technical science, docent, a.antsev@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.9.048

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ФОРМУ И РАЗМЕРЫ ЛУНКИ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Т.З. Нгуен, В.М. Волгин

В данной работе исследовано влияние теплофизических свойств обрабатываемых материалов и долей общего расхода энергии на геометрические характеристики эрозионных лунок. Проведено математическое моделирование формирования эрозионных лунок в процессе электроэрозионной обработки (ЭЭО) с изменением теплофизических свойств обрабатываемых материалов и долей общего расхода энергии. Полученные результаты позволяют прогнозировать производительность обработки и шероховатость поверхности после ЭЭО. Проведено сравнение полученных результатов с известными работами и экспериментальными данными.

Ключевые слова: тепловая задача, моделирование эрозионной обработки, эрозионная лунка, канал разряда, доля энергии импульса.

Электроэрозионная обработка основана на удалении металла с электродов под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии. Под воздействием высоких температур в зоне электрического разряда происходят нагрев, расплавление, и частичное испарение металла. Информация о распределении тепловых полей в объеме заготовки позволяет найти количество материала, удаленного с электрода и форму и размеры лунки.

Для оценки величины температурного воздействия на поверхность заготовки в процессе ЭЭО широкое применение находят методы математического моделирования. Рассматриваемые модели с высокой точностью позволяют оценить влияние режимных параметров ЭЭО на формирование показателей качества обработанной поверхности [1], однако не в полной мере учитывают изменение теплофизических свойств обрабатываемых материалов и доли общего расхода энергии η .

Обычно тепловую задачу упрощают, неявно принято, что величины теплофизических свойств обрабатываемых материалов постоянные, в частности при любой температуре для твердого и расплавленного веществ, тепловой источник стационарным, действующим в течение импульса, постоянный доли общего расхода энергии η и фазовые превращения в месте действия разряда не учитываются. Это объясняет результаты моделирования сильно отличаются от результатов эксперимента.

Таким образом, целью работы является разработка теоретической модели, позволяющей повысить точности моделирования формирования эрозионных лунок с изменением теплофизических свойств обрабатываемых материалов и доли общего расхода энергии η при ЭЭО.

Для моделирования тепловых процессов при ЭЭО использовано дифференциальное уравнение теплопроводности без учета внутреннего источника задается выражением [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = \text{div}(k \text{grad} T), \quad (1)$$

где T – температура; ρ – плотность материала электрода; k – коэффициент теплопроводности; C_p – теплоемкость.

В работе [2] для расчета теплопередачи распределения теплового потока по поверхности электрода нужно описывать распределением Гаусса. Согласно [2], распределение теплового потока на поверхности электрода, созданного каналом разряда, имеет зависимость от координаты x и времени t :

$$q(x, t) = q_0 \exp\left(-4.5 \left(\frac{x - x_0}{R(t)}\right)^2\right), \quad (2)$$

где q_0 – максимальный тепловой поток.

При $x_0 = 0$, максимальный тепловой поток можно рассчитать по следующему соотношению [2]:

$$q_0 = \frac{3,77\eta E}{\pi R_p^2 t_{on}}, \quad (3)$$

где x – координата, характеризующая расстояние от центра канала электрического разряда; $E = UIt_{on}$ – энергия импульса; I – ток; U – напряжение пробоя; t_{on} – длительность импульса; η – доля энергии импульса, поглощаемая заготовкой.

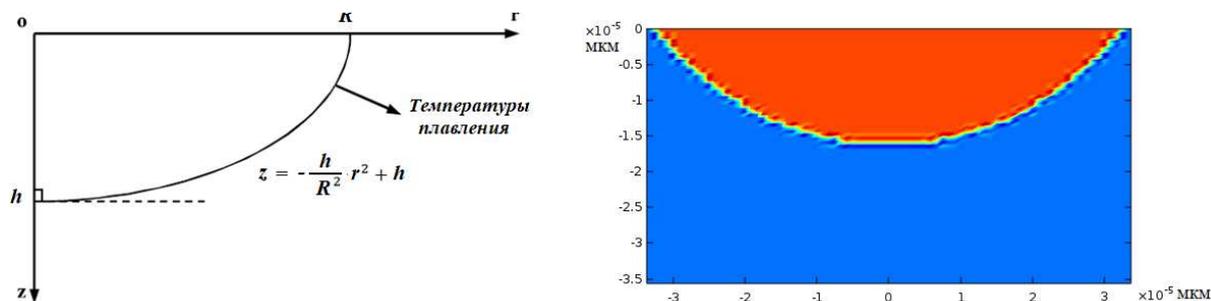


Рис. 1. Геометрические формы эрозионного лунка

Радиус плазменного канала является важным параметром при моделировании тепловых процессов в ЭЭО. Согласно [3,4], предлагается формула для оценочного расчета радиуса плазменного канала при энергии разряда в диапазоне 0.3...670 мДж:

$$R(I, t) = 2.04 \cdot 10^{-3} I^{0.43} t_{on}^{0.44}, \quad (4)$$

Объем эрозионной лунки рассчитывает по формуле [3,5]:

$$V_{л} = \int_0^R 2\pi r dr = \frac{1}{2} \pi R^2 h, \quad (5)$$

Следовательно, скорость удаление материала можно рассчитать [3,5]:

$$M_{об} = V_{л} f, \quad (6)$$

где $f = \frac{1}{t_{on} + t_{off}}$ – частота импульсов.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (1), определяющее температурное поле в заготовке выражает связь между изменением температуры и теплофизическими свойствами материалов. Теплофизические свойства материалов играют важную роль для решения этой проблемы. Температуры плавления и кипения имеют большое значение для прогнозирования формы лунки. Как правило, чем более температура плавления тем меньше эрозионного съема материала. Моделирование формирования единичной лунки посвящено большое количество работ, в большинстве теплофизические свойства считаются постоянными, не зависят от температуры. Однако теплофизические свойства в целом существенно зависят от температуры и происходит изменение фазы (см. рис. 2), следовательно, могут влиять на точность результатов моделирования.

Для учета фазового перехода материала заготовки в математическое описание вводится плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость, зависящие от температуры:

$$\rho(T) = \theta(T)\rho_{\phi 1} + (1 - \theta(T))\rho_{\phi 2}, \quad (7)$$

$$k(T) = \theta(T)k_{\phi 1} + (1 - \theta(T))k_{\phi 2}, \quad (8)$$

$$C_p(T) = \frac{1}{\rho(T)} (\theta(T)\rho_{\phi 1}C_{p,\phi 1} + (1 - \theta(T))\rho_{\phi 2}C_{p,\phi 2}) + L_H \frac{\partial \alpha}{\partial T}, \quad (9)$$

где $\alpha = \frac{1(1 - \theta(T))\rho_{\phi 2} - \theta(T)\rho_{\phi 1}}{2\theta(T)\rho_{\phi 1} + (1 - \theta(T))\rho_{\phi 2}}$; L_H – скрытая теплота плавления, кДж/кг;

$\theta(T)$ – единичная функция, равная нулю при $T > T_{пл}$ и равная единице при $T < T_{пл}$; $\rho_{\phi 1}$, $k_{\phi 1}$, $C_{p,\phi 1}$ – плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость – в твердом состоянии; $\rho_{\phi 2}$, $k_{\phi 2}$, $C_{p,\phi 2}$ – плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость – в жидком состоянии; $T_{пл}$ – температура плавления.

Следовательно, уравнение нестационарного теплопереноса на поверхности ЭИ имеет вид:

$$C(T)\rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k(T)\text{grad}T), \quad (10)$$

Доля общего расхода энергии η для анода является важным параметром, так как он определяет величину теплового потока, который передан заготовке. Чем выше доля энергии импульса, тем больше материала будет удалено единичным разрядом. Таким образом, скорость удаления материалов различных доли общего расхода энергии импульса будет характеризоваться удельным расходом энергии на единицу массы снятого материала.

Из рис. 3 показано, что доли общего расхода энергии сильно влияет на скорость удаления материалов. В соответствии с рекомендациями работы [4] принимаем $\eta = 0.183$ при низкой энергии (меньше 100 мДж) и $\eta = 0.183 - 0.2$ при средней энергии (100 – 650 мДж). Однако при средней энергии и высокой энергии результаты моделирования сильно отличается от результатов эксперимента. Поэтому в данной работе был использован подход, на введении функции доли общего расхода энергии (%) изменяется монотонно:

$$\eta = 4.271 \cdot I^{0.5208}, \quad (11)$$

Для оценки достоверности и сравнения результатов моделирования с учетом изменений теплофизических свойствах материалов и фазового перехода приведены в работе [8], а параметры режимов обработки и ре-

зультатов моделирования приведены в табл.1. В исходном состоянии образец имеет прямоугольное сечение с размерами 750x300 мкм. Напряжение пробое $U = 25$ В; доля общего расхода энергии $\eta = 0.183$; плотность $\rho = 7545$ кг/м³; коэффициент теплопроводности $k = 56.1$ Вт/(м К); удельная теплоемкость $C_p = 575$ Дж/(кг К); скрытая теплота плавления $L_H = 247$ кДж/кг; температура плавления $T_{пл} = 1808$ К.

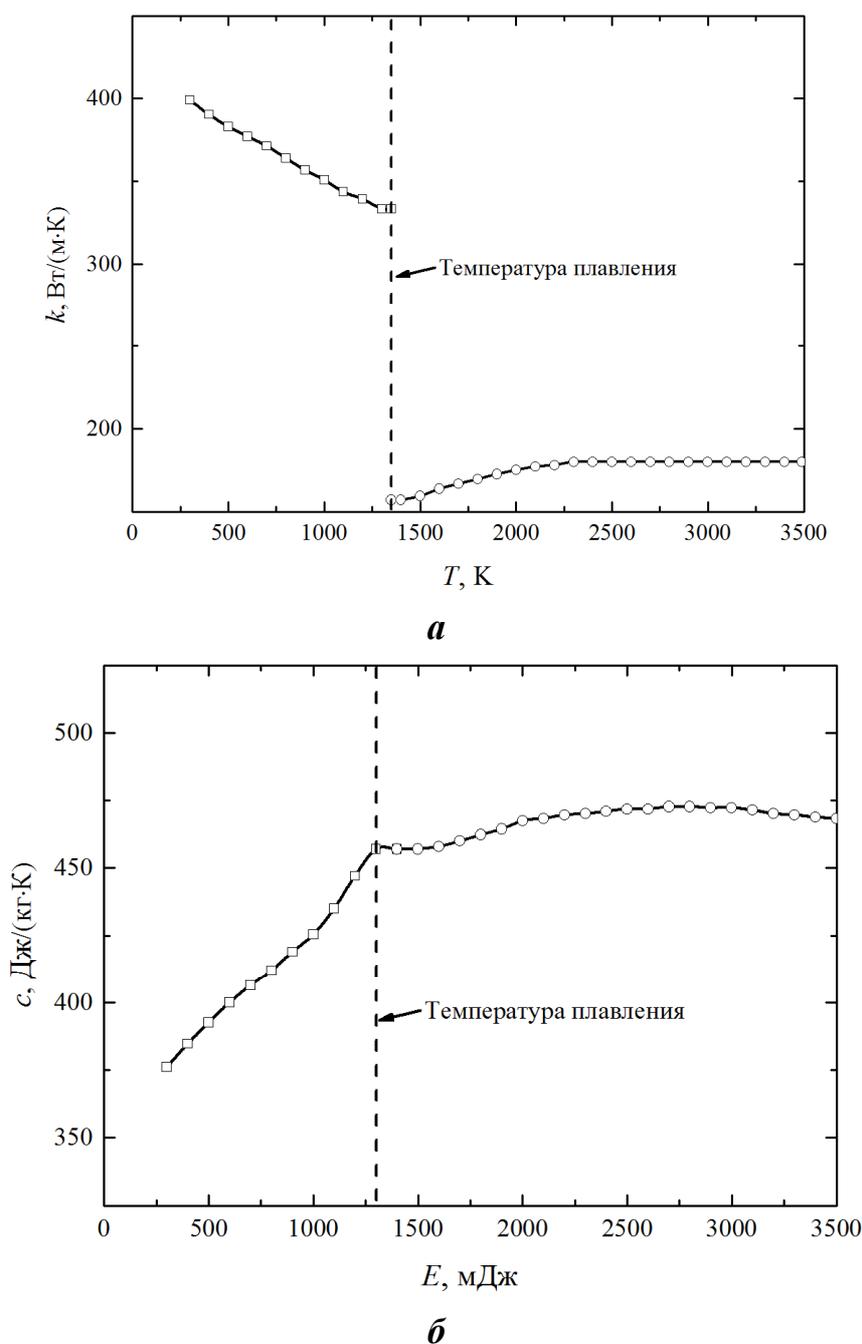


Рис. 2. Теплофизические свойства материала (меди) зависящими от температуры [6]: а – зависимость коэффициента теплопроводности от температуры; б - зависимость удельной теплоемкости от температуры

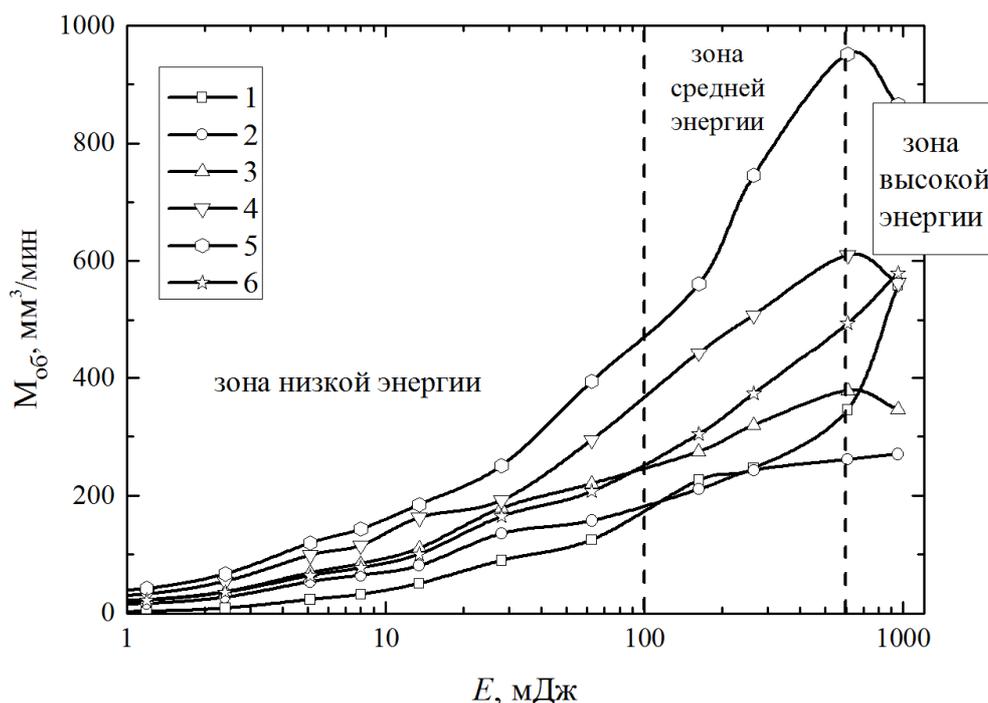


Рис. 3. Влияние доли общего расхода энергии на скорость удаления материалов: 1 – эксперимент; 2 – работа [4] при $\eta=0.183$; 3 – работа [4] при $\eta=0.2$; 4 – работа [4] при $\eta=0.25$; 5 – работа [4] при $\eta=0.3$; 6 – работа [7]

В табл. 1 представлены сравнения результатов моделирования эрозионных лунок, полученные с использованием различных теплофизических свойствах исследуемых материалов. Результаты моделирования показали, что размеры лунок при переменных теплофизических свойствах материалов и фазового перехода сильно отличаются от результатов при постоянных теплофизических свойствах материалов (13.18 – 15.64 % по радиусу и 22.07 – 24.79 по глубине). Полученные в результате моделирования зависимости объема эрозионной лунки от энергии импульса (см. рис. 4) показывают, что наилучшее соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными обеспечивается при использовании переменных теплофизических свойствах обрабатываемых материалов и фазового перехода. Однако, модель, рассмотренная выше, не учитывает испарение металла с поверхности электрода, но оно имеет место.

В табл. 2 представлены сравнения результатов моделирования эрозионных лунок, полученные с использованием различных доли общего расхода энергии. Из анализа результатов моделирования зависимости объема эрозионной лунки от энергии импульса показывают, что при увеличении энергии импульса увеличится доли общего расхода энергии и наилучшее соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными обеспечивается с учетом переменных доли общего расхода энергии.

Таблица 1

Сравнения результатов моделирования эрозионных лунок с учетом изменения теплофизических свойствах материалов и фазового перехода

№	I, А	t _{оп} , мкс	E, мДж	При постоянных теплофизических свойствах		При переменных теплофизических свойствах		ΔR, %	Δh, %
				R, мкм	h, мкм	R, мкм	h, мкм		
1	2.34	5.6	0.33	12.34	9.56	10.41	7.45	15.64	22.07
2	3.67	13	1.19	19.27	13.37	16.40	10.06	14.89	24.76
3	8.5	24	5.1	31.86	18.97	27.66	14.67	13.18	22.67
4	10	32	8	38.09	21.01	32.37	15.86	15.02	24.51
5	20	56	28	60.20	28.20	51.81	21.21	13.94	24.79
6	25	100	62.5	78.05	33.33	67.12	25.12	14.00	24.63

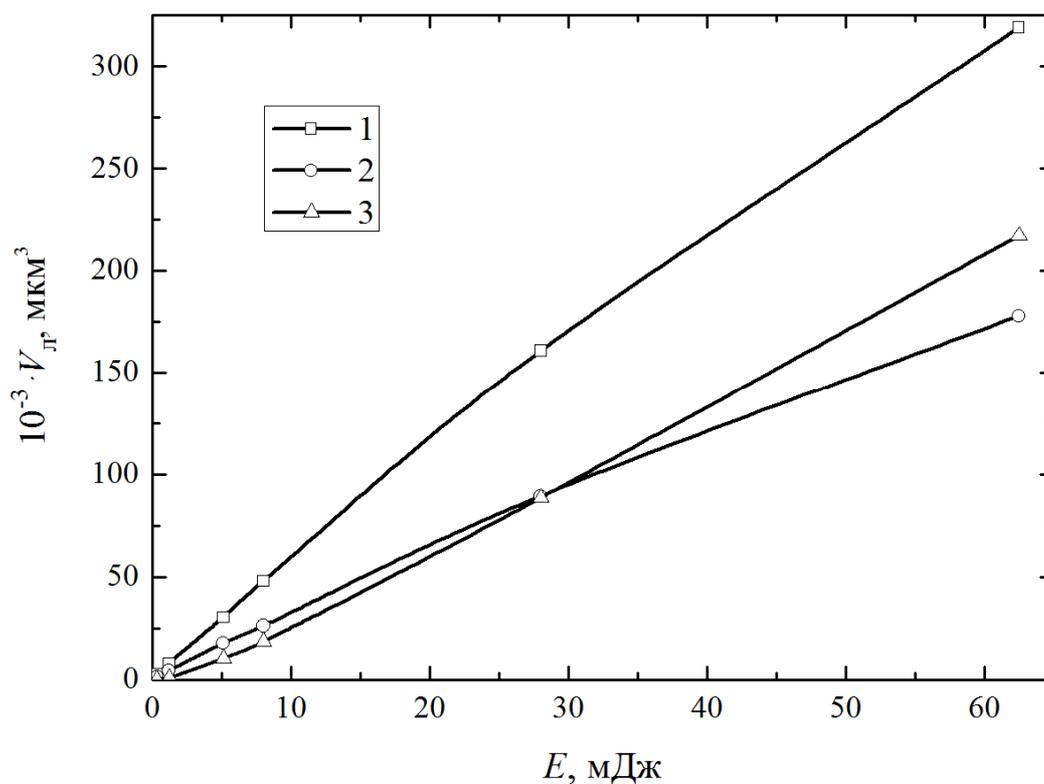


Рис. 4. Влияние теплофизических свойств обрабатываемых материалов на объем эрозионной лунки: 1 - при постоянных теплофизических свойствах; 2 – при переменных теплофизических свойствах; 3 – результаты эксперимента

Таблица 2

Сравнения результатов моделирования при различных долях энергии η

№	I, А	$t_{\text{оп}}$, мкс	E, мДж	η , %	$10^3 \cdot V_{\text{л}}, \text{мкм}^3$				
					Расчет [4]	Расчет [5]	Расчет [7]	Экспер. [7]	Наш подход
1	2.34	5.6	0.33	6.65	1.33	0.12	1.52	0.03	0.18
2	2.85	7.5	0.53	7.37	2.18	0.38	2.53	0.23	0.35
3	3.67	13	1.19	8.41	4.22	1.48	5.59	0.80	0.97
4	5.3	18	2.39	10.18	9.23	5.96	12.10	2.86	2.92
5	8.5	24	5.1	13.02	23.54	12.20	28.07	10.21	10.29
6	10	32	8	14.17	36.94	24.87	44.25	18.35	18.21
7	12.8	42	13.44	16.11	60.83	44.93	75.58	38.04	36.22
8	20	56	28	20.33	133.49	127.52	162.45	88.50	103.14
9	25	100	62.5	22.83	272.99	257.53	359.84	217.08	241.81

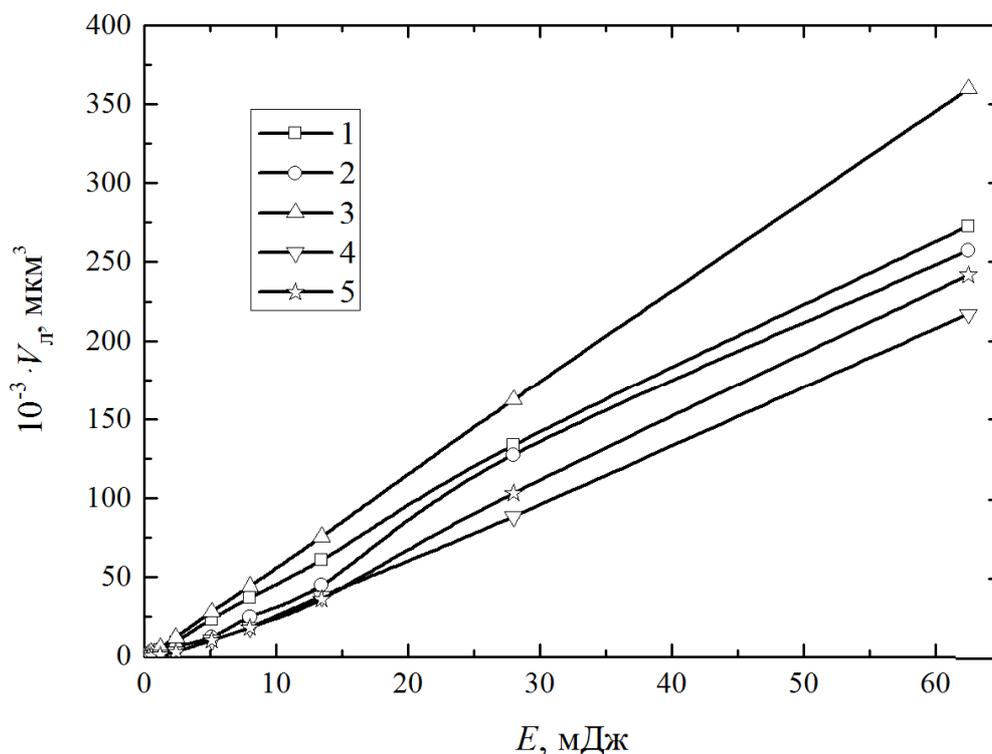


Рис. 5. Влияние доли общего расхода энергии на объем эрозионной лунки: 1 – результаты по работе [4]; 2 – результаты по работе [5]; 3 – результаты по работе [7]; 4 – результаты по эксперименту [7]; 5 – результаты с использованием уравнения (7)

Таким образом, можно сделать вывод, что для повышения точности моделирования формирования эрозионных лунок при ЭЭО необходимо учитывать зависимости теплофизических свойствах обрабатываемых материалов от температуры и зависимости доли общего расхода энергии от энергии импульса.

Список литературы

1. Абляз Т.Р., Муратов К.Р., Красновский Е.Е., Борисов Д.А. Моделирование температурного воздействия единичного импульса при электроэрозионной обработке // Вестник ПНИПУ. 2018. Т. 20, №1.
2. Lyubimov V.V., Volgin V.M., Gnidina I.V., Salomatnikov M.S. Formation of the workpiece shape and surface finish during electrical discharge machining // Procedia CIRP. 2018. V. 68. P. 319-324.
3. Assarzadeh S., Ghoreishi M. Prediction of root mean square surface roughness in low discharge energy die-sinking EDM process considering the effects of successive discharges and plasma flushing efficiency // J. Manuf. Process. 2017. V. 30. P. 502–515.
4. Joshi S.N., Pande S.S. Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process // J. Manuf. Process. 2010. V. 12. P. 45–56.
5. Huang H., Zhang Z., Ming W., Xu Z., Zhang Y. A novel numerical predicting method of electric discharge machining process based on specific discharge energy // Int. J. Adv. Manuf. Tech. 2017. V. 88. P. 409-424.
6. Weingärtner E., Kustera F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // Procedia CIRP. 2012. V. 2. P. 74-78.
7. DiBitonto D.D., Eubank P.T., Patel M.R., Barrufet M.A. Theoretical models of the electrical discharge machining process – I. A simple cathode erosion model. J. Appl. Phys. 1989. V 66. P. 4095 – 4103.
8. Jamshid Sabbaghzadeh, Maryam Azizi, Torkamany M.J. Numerical and experimental investigation of seam welding with a pulsed laser // Opt. Laser Technol. 2008. V. 40. P. 289–296.

Нгуен Тхань Зиен, аспирант, roguha201@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Волгин Владимир Мирович, д-р техн. наук, профессор, volgin@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

***EFFECT OF THE VARIABILITY OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES
OF THE WORKPIECE MATERIAL ON THE SHAPE AND SIZE OF THE CRATERS AT
ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING***

T.D. Nguyen, V.M. Volgin

In this paper, the influence of the thermophysical properties of workpiece and fraction of discharge energy on the geometric characteristics of the erosion crater is investigated. A mathematical modeling of the formation of erosion crater on the electrical discharge machining (EDM) with the change of thermophysical properties of workpiece and fraction of discharge energy. The results are compared with the known works and experimental data. The results obtained make it possible to predict the surface roughness in the EDM process.

Key words: thermal problem, modeling of electrical discharge machining, erosion crater, discharge channel, fraction of discharge energy.

Nguyen Thanh Diem, postgraduate, poguha201@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Volgin Vladimir Mirovich, doctor of technical sciences, professor, volgin@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.785.54

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ГЕНЕРАТОРЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

**И.Х. Исрафилов, А.Т. Галиакбаров, А.Т. Габдрахманов,
А.Д. Самигуллин, Р.Т. Галиакбаров**

В статье рассматривается математическое описание движения газа в электрическом разряде, движущемся в межэлектродном промежутке под действием силы Лоренца. Приведенная модель электрической дуги позволит рассчитать магнитное поле, действующее на заряды в разряде и объяснить возникновение эффекта шунтирования дуги при движении по электродам.

Ключевые слова: электрический разряд, электрическая напряженность, магнитная индукция.

В настоящее время используются плазменные устройства с поперечным обдувом дуги, движущиеся между коаксиально расположенными электродами. Эти устройства позволяют создавать большие объемы плазмы и обрабатывать большие площади [1, 2]. Но для данных видов плазмотронов не разработан инженерный метод расчета основных характеристик.

В работе исследуется модель электрической дуги, находящейся под действием стационарного, однородного внешнего магнитного поля. Будем пренебрегать трением и наличием в газе свободных электрических зарядов. Магнитную проницаемость будем считать постоянной. Для магнитогазодинамических исследований недостаточно пользоваться обычными уравнениями движения газа. Помимо действующих чисто механических объемных сил необходимо учитывать силу Лоренца, выражающую действие внешнего магнитного поля на движущийся электропроводный газ.

Следовательно, нельзя рассматривать уравнение движения отдельно от уравнений электромагнитного поля. Уравнения движения допускают самостоятельное интегрирование отдельно от общих уравнений электродинамики сплошных сред только в очень упрощенной постановке [3, 4].

Рассматриваем обобщенную МГД задачу о движении газа по межэлектродному пространству в случае применения электропроводного газа при наличии продольного однородного магнитного поля (относительно направления потока) (рис.1). В уравнениях используются общепринятые обозначения.

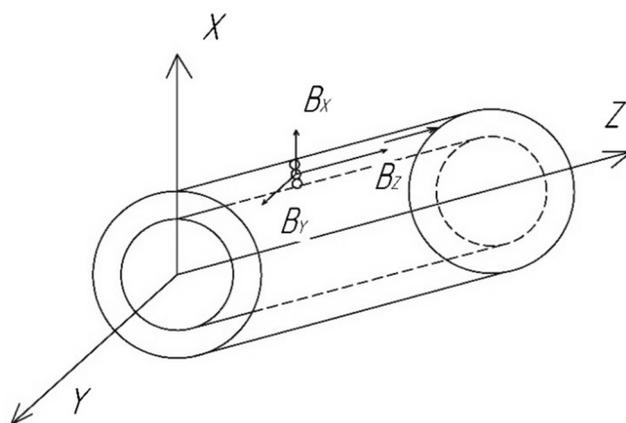


Рис. 1. Графическая интерпретация постановки задачи

При принятых упрощениях система уравнений МГД принимает вид:

$$\begin{aligned}
 \rho(\bar{V} \text{grad}) \bar{V} &= -\text{grad} p + \rho v \nabla^2 \bar{V} + \bar{j} \times \bar{B}, \\
 \text{div} \bar{V} &= 0, \\
 \text{rot} \bar{B} &= \mu_0 \bar{j}, \\
 \text{div} \bar{B} &= 0, \\
 \text{rot} \bar{E} &= 0, \\
 \text{div} \bar{E} &= 0, \\
 \bar{j} &= \delta(\bar{E} + \bar{V} \times \bar{B});
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Искомыми величинами в данной задаче является: поле скоростей \bar{V} , электрическая напряженность \bar{E} , магнитная индукция. Система дополняется уравнениями Максвелла.

В случае кольцевого межэлектродного пространства решение задачи сводится к определению трех функций $V_z = w(x, y)$, $B_x = B(y, z)$ и $B_y = B(x, y)$.

Поведение электрического разряда в межэлектродном пространстве заранее неизвестно даже для упрощенных условий ее горения. В рассматриваемом случае определение направления магнитной индукции, создаваемой дугой еще сложнее.

Принимая во внимание наличие однородного внешнего продольного поля, заключим, что суммарные компоненты магнитного поля с учетом собственного поля дуги будут равны:

$$B_x = 0; B_y = 0; B_z = B_0 + B(x, y); B_0 = const; \quad (2)$$

Величину B/μ_0 можно рассматривать как функцию токов $j(j_x, j_y, j_z)$.

Тогда получим уравнения: $\mu_0 j_x = dB/dy; \mu_0 j_y = dB/dx$.

Если учесть, что скорость V по осям ox и oy равна нулю, то система (1) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \partial P / \partial x &= j_y B_z; \\ \partial P / \partial y &= -j_x B_z; \\ \partial P / \partial z &= j_x B_y - B_x j_y + \rho v \nabla^2 \omega; \\ j_z &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Можно предположить, что изменение давления на участках $\partial x, \partial y, \partial z$ равно нулю тогда:

$$\begin{aligned} B_0 (\partial B_x / \partial z) - B_y ((\partial B_x / \partial y) - (\partial B_y / \partial x)) &= 0, \\ B_0 (\partial B_y / \partial z) + B_x ((\partial B_x / \partial y) - (\partial B_y / \partial x)) &= 0, \\ \rho v \nabla^2 \omega \mu_0 - (\partial / \partial z) ((B_y^2 - B_x^2) / 2) &= 0. \end{aligned}$$

Применяя операцию *rot* к обеим частям уравнения $\vec{j} = \delta(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$, мы освобождаемся от электрического поля. Затем составляем проекции на оси координат обеих частей уравнения:

$$\begin{aligned} (1/\mu_0) \left[(\partial^2 B_x / \partial y^2) - (\partial^2 B_y / \partial y \partial x) - (\partial^2 B_x / \partial z^2) \right] + (\delta \partial_w B_x / \partial z) &= 0 \\ - (1/\mu_0) \left[(\partial^2 B_x / \partial y \partial x) - (\partial^2 B_y / \partial x^2) - (\partial^2 B_y / \partial z^2) \right] + (\delta \partial_w B_y / \partial z) &= 0 \quad (4) \\ - (1/\mu_0) \left[(\partial^2 B_x / \partial z \partial x) + (\partial^2 B_y / \partial y \partial z) \right] + \delta ((\partial_w B_x / \partial x) + (\partial_w B_y / \partial y)) &= 0 \end{aligned}$$

Таким образом, полученные системы характеризуют распределение скоростей и структуру магнитного поля внутри межэлектродного пространства.

С учетом уравнения 2 и 3, а также принимая во внимание, что $B_x = 0; B_y = 0$ и представив $\partial p / \partial z = \Delta p / l$ получим выражение:

$$\rho v \nabla^2 \omega = \frac{\Delta p}{l}.$$

На основании этого уравнения можно считать, что продольное внешнее магнитное поле не оказывает влияния на скорость движения газа в отличие от поперечного магнитного поля.

Для наших расчетов используем модель дуги, движущаяся под воздействием магнитного поля, схема которой показана на рис. 2.

Для определения скорости движения дуги необходимо определить магнитную индукцию поперечного магнитного поля в любой точке пространства для различных сечений электродов.

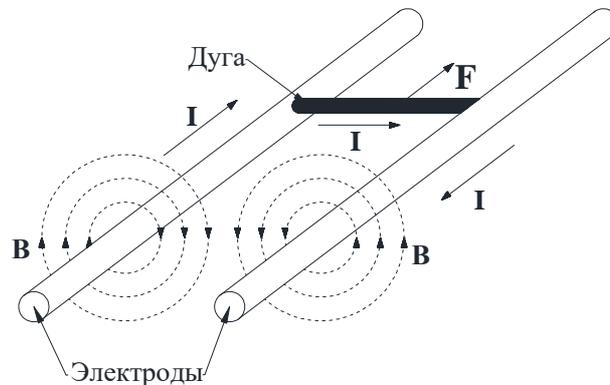


Рис. 2. Дуга, движущаяся под воздействием собственного магнитного поля

Если проинтегрировать вклады в магнитное поле всех отдельных участков прямолинейного проводника с током, то получится формула для магнитной индукции поля прямого тока (5):

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}, \quad (5)$$

и для проводника конечной длины (6):

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi \cdot R} \cdot I \cdot (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)), \quad (6)$$

где α_1 и α_2 углы между проводником конечной длины и отрезками r_1 и r_2 соединяющие концы проводника с исследуемой точкой.

Используя выражение (6) и принцип суперпозиции полей, создаваемые двумя электродами (рис. 3) находится частный случай нахождения распределения магнитного поля в межэлектродном промежутке (рис. 4).

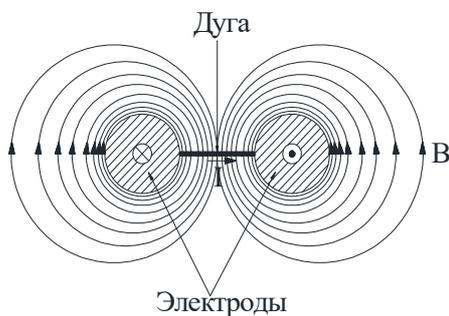


Рис. 3. Магнитное поле создаваемое током дуги

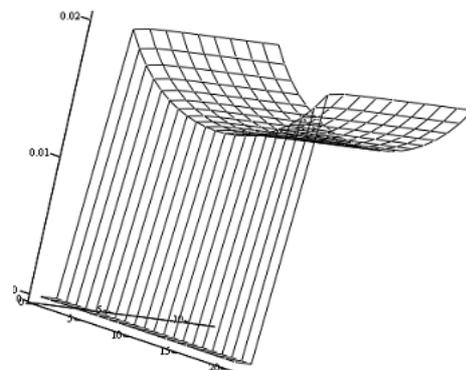


Рис. 4. Распределение магнитного поля в межэлектродном пространстве $d=8\text{мм}$, $L=8\text{мм}$, $I=300\text{А}$

Магнитное поле и соответственно сила Ампера F будет оказывать на разные участки дуги неравномерное воздействие (рис. 4), и разные участки дуги будут перемещаться с различной скоростью. Возможно, это является одной из причин появления эффекта шунтирования при движении дуги (рис. 5).

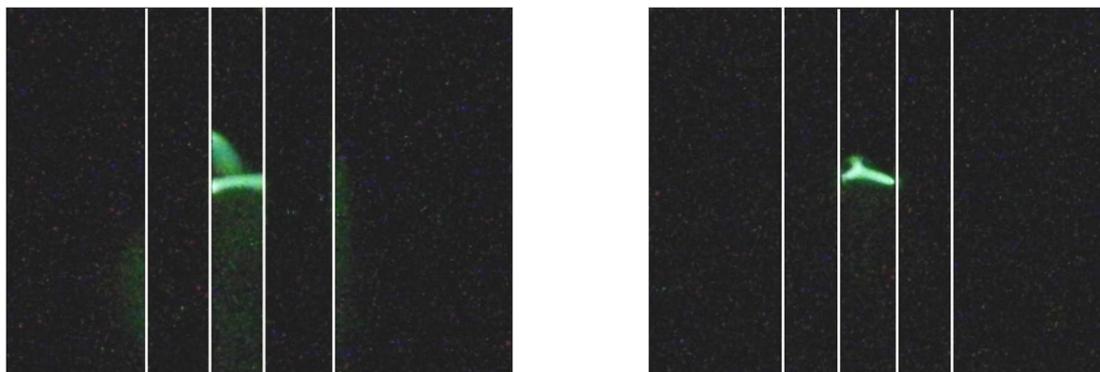


Рис. 5. Фотографии перезамыкания дуги на анодном участке (шунтирование дуги) (время экспозиции 25мкс)

В движущейся электрической дуге протекает множество разнообразных процессов, учесть которые полностью не представляется возможным. Приведенные системы уравнений при постановке задачи, а также расчеты при определенных условиях однозначности помогут в составлении физических моделей движущейся дуги и проектировании плазмотронов [5].

Список литературы

1. Исследование влияния параметров импульсного плазменного генератора на показатели качества технологического процесса / А.Т. Галиакбаров, А.И. Нугуманова, В.В. Звездин, А.Т. Габдрахманов, Р.Р. Саубанов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 2. С.50-52.
2. Исрафилов И.Х., Саубанов Р.Р., Рахимов Р.Р. Перспективное применение высококонцентрированной энергии для поверхностной термобработки изделий // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2011. № 1. С. 25-30.
3. Ясько О.И. Взаимодействие дуги с электродами плазмотрона. - Мн.: Наука и техника. 1982.
4. Моделирование и методы расчета физико-химических процессов в низкотемпературной плазме. М.: Изд-во «Наука». 1974.
5. Габдрахманов А.Т., Исрафилов И.Х., Галиакбаров А.Т. Исследование движущейся дуги в поперечно обдуваемом потоке // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Наука и образование в современном обществе: вектор развития»: В 7 частях. М.: ООО «Ар-Консалт». 2014. С. 25-26.

Исрафилов Ирек Хуснемарданович, д-р техн. наук, профессор, зав.кафедрой, irmaris@yandex.ru, Россия, Набережные Челны, Набережночелнинский институт Казанского федерального университета,

Галиакбаров Азат Талгатович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, azatgaliakbarov@yandex.ru, Россия, Набережные Челны, Набережночелнинский институт Казанского федерального университета,

Габдрахманов Азат Талгатович, канд. техн. наук, доцент, veyron000@mail.ru, Россия, Набережные Челны, Набережночелнинский институт Казанского федерального университета,

Самигуллин Алмаз Динаисович, ст. преподаватель, samigullin86@mail.ru, Россия, Набережные Челны, Набережночелнинский институт Казанского федерального университета,

Галиакбаров Рафаэль Талгатович, аспирант, galiakbarov.r@yandex.ru, Россия, Набережные Челны, Набережночелнинский институт Казанского федерального университета

CALCULATION OF PARAMETERS OF A MOVING ELECTRIC ARC IN THE GENERATOR OF LOW-TEMPERATURE PLASMA

I.H. Israfilov, A.T. Galiakbarov, A.T. Gabdrakhmanov, A.D. Samigullin, R.T. Galiakbarov

The mathematical description of the gas motion in an electric discharge moving in the interelectrode gap under the action of the Lorentz force is considered in the article. The above model of the electric arc will allow to calculate the magnetic field acting on the charges in the discharge and it explain the occurrence of the shunting effect of the arc when moving along the electrodes.

Key words: electric discharge, electric tension, magnetic induction.

Israfilov Irek Husnemardanovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, irmaris@yandex.ru, Russia, Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University,

Galiakbarov Azat Talgatovich, candidate of technical sciences, docent, head of department, azatgaliakbarov@yandex.ru, Russia, Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University,

Gabdrakhmanov Azat Talgatovich, candidate of technical sciences, docent, veyron000@mail.ru, Russia, Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny Institute of the Kazan Federal University,

Samigullin Almaz Dinaisovich, senior teacher, samigullin86@mail.ru, Russia, Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny Institute of the Kazan Federal University,

Galiakbarov Rafael Talgatovich, postgraduate, galiakbarov.r@yandex.ru, Russia, Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny Institute of the Kazan Federal University

ДИСКРЕТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЫ

С.Я. Хлудов, М.О. Борискина, А.С. Хлудов

Рассмотрены особенности проектирования многоступенчатой режущей пластины с дискретным исполнением режущей кромки для оснащения токарных резцов с механическим креплением СМП для черновой обработки. В качестве варианта исполнения рассматривается режущая пластина с режущей кромкой, выполненной по лекальной кривой «дуга – прямая - дуга», а все ступени срезают одинаковые по глубине припуски.

Ключевые слова: схема срезания припуска; режущая кромка, режущая пластина, лекальная кривая.

Анализ конструкций современных режущих пластин показал, что в условиях чистовой и получистовой обработке дискретное исполнение режущей кромки позволяет обеспечить варьирование формой поперечного сечения срезаемого слоя путем изменения формы режущей кромки на ступенях, что оказывает влияние на соотношение радиальной и осевой составляющих силы резания и, соответственно, изменяет виброустойчивость процесса точения [1-4]. В результате исследования установлено, что в процессе чистового точения за счет уменьшения глубины резания и разделения тепловых потоков режущие пластины с дискретной режущей кромкой имеют в 2,5 раза большую стойкость в сравнении с режущими пластинами стандартного исполнения.

Сделанные выводы по условиям эксплуатации режущих пластин с дискретным исполнением режущей кромки априорно доказывают возможность дискретного исполнения режущей кромки и для режущих пластин, используемых в условиях чернового точения. Режущие пластины с дискретным исполнением режущей кромки для оснащения токарных резцов для чернового точения получили название «многоступенчатые режущие пластины».

Проектирование формы режущей кромки многоступенчатой режущей пластины осуществляется при ее дискретном представлении. Прямолинейные участки режущей кромки задаются координатами двух точек, а участки, выполненные по дуге окружности, координатами не менее трех точек, включая и координаты точки центра окружности, на которой располагается дуга.

Начало системы координат, относительно которой рассчитываются координаты точек дискретного представления режущей кромки, связано с центром окружности отверстия режущей пластины стандартного исполнения. В качестве стандартных пластин могут быть использованы СМП

SNMG, имеющую форму квадрата с углом при вершине $\beta = 90^\circ$, или СМП TNMX и WNMG, имеющих форму треугольника с углами при вершине, соответственно, $\beta = 60^\circ$ и $\beta = 80^\circ$ (рис. 1).

При проектировании режущей кромки многоступенчатой пластины при выполнении условия, когда все ступени срезают одинаковые по глубине припуски, в качестве исходных параметров приняты следующие:

L – длина режущей кромки СМП стандартного исполнения;

β – угол при вершине СМП стандартного исполнения;

φ – главный угол в плане при использовании СМП стандартного исполнения;

$\varphi_{1(i)}$ – вспомогательный угол в плане на i -той ступени

t_i – глубина резания на i -той ступени;

R_i – радиус при вершине i -той ступени.

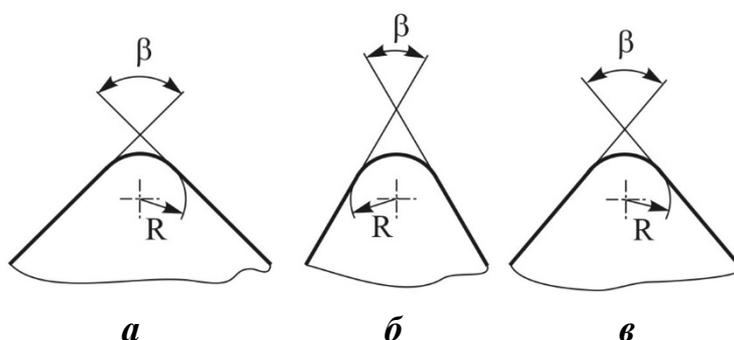


Рис. 1. Вариант исполнения вершины на режущих пластина стандартного исполнения: а - СМП SNMG с $\beta = 90^\circ$; б - СМП TNMX с $\beta = 60^\circ$; в - СМП WNMG с $\beta = 80^\circ$

При выполнении условия, когда все ступени срезают одинаковые по глубине припуски, форма режущей кромки на ступенях режущей пластины формируется по двум вариантам. В первом случае криволинейный участок активной части режущей кромки на ступенях выполняется по дуге окружностей с равными радиусами R_i . Во втором случае значения радиусов при вершинах ступеней выбираются не равными друг другу.

При дискретном представлении режущей кромки на ступенях по первому варианту расчет координат точек, которыми задается режущая кромка, осуществляется в следующем порядке.

Режущая кромка первой ступени, наиболее удаленной от точки O центра окружности отверстия стандартной пластины, состоит из прямолинейных и криволинейных участков (рис. 2).

Координаты точки O_1 определяются по следующим зависимостям:

$$X_{O_1} = 0; \quad (1)$$

$$Y_{O_1} = L \cos \frac{\beta}{2} - \frac{R_1}{\sin \varphi}, \quad (2)$$

где угол φ рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \frac{\pi - \beta}{2} . \quad (3)$$

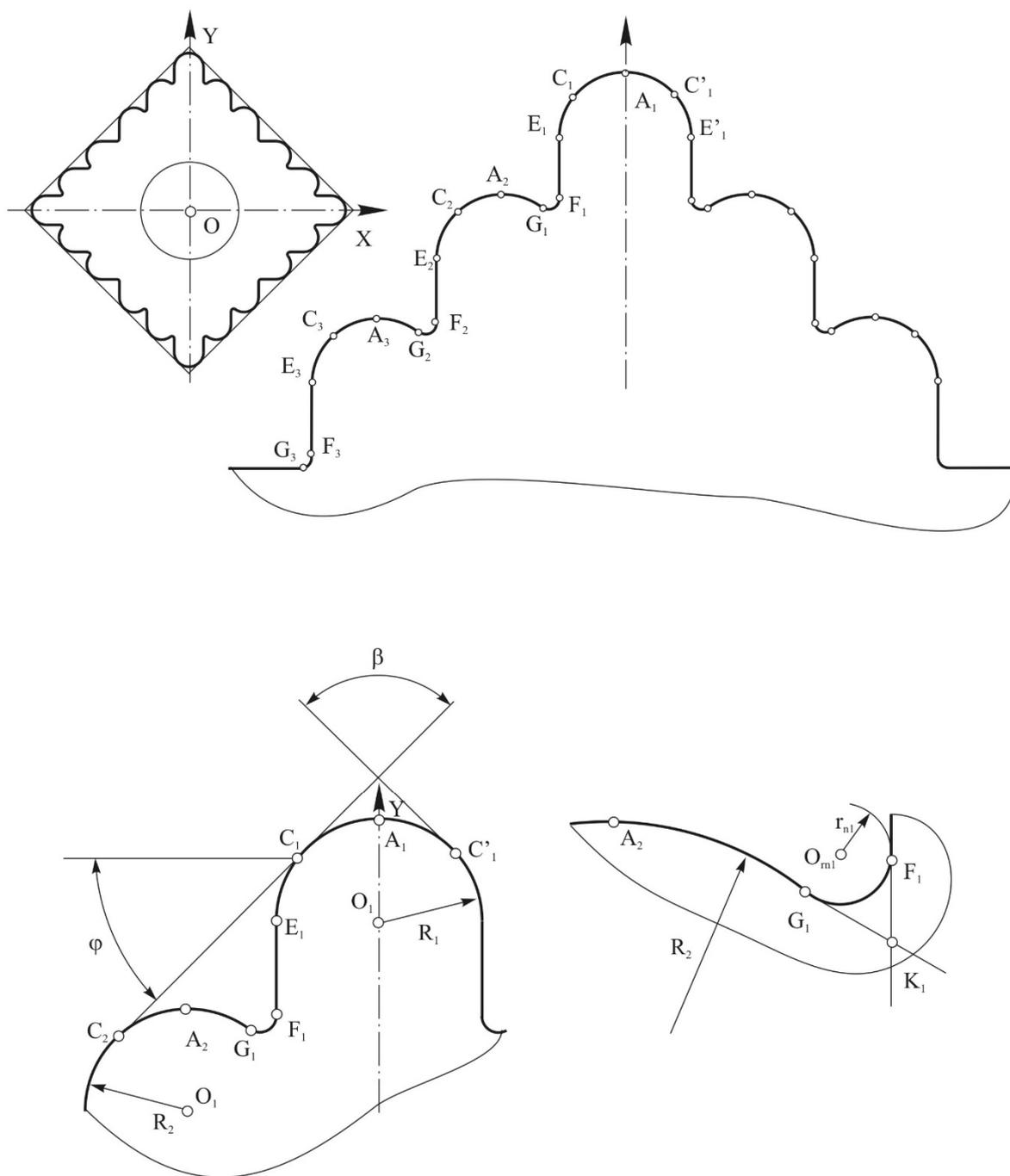


Рис. 2. Дискретное представление режущей кромки многоступенчатой СМП

Точка A_1 - наиболее удаленная точка режущей кромки первой ступени от начала координат. Она расположена на дуге окружности с радиусом R_1 . Координаты точки A_1 рассчитываются из выражений:

$$X_{A_1} = X_{O_1}; \quad (4)$$

$$Y_{A1} = Y_{O1} + R_1. \quad (5)$$

Точка С принадлежит дуге окружности радиусом R_1 и располагается на прямолинейном участке режущей кромки режущей пластины стандартного исполнения, в габаритах которой проектируется режущая пластина с многоступенчатым исполнением. Ее координаты определяются по зависимостям:

$$X_{C1} = -R_1 \sin \varphi; \quad (6)$$

$$Y_{C1} = Y_{O1} + R_1 \cos \varphi. \quad (7)$$

При использовании многоступенчатой режущей пластины для оснащения как правого, так и левого токарных резцов, первая ступень имеет симметричную форму, а точка C'_1 располагается симметрично относительно точки C_1 . В этом случае ее координаты будут

$$X'_{C1} = R_1 \sin \varphi; \quad (8)$$

$$Y'_{C1} = Y_{O1} + R_1 \cos \varphi. \quad (9)$$

Точка E_1 является точкой сопряжения дуги окружности радиусом R_1 и прямолинейного участка EF активной части режущей кромки первой ступени. Координаты точки рассчитываются по формулам:

$$X_{E1} = X_{O1} - R_1; \quad (10)$$

$$Y_{E1} = Y_{O1}. \quad (11)$$

Точка F_1 является точкой сопряжения прямолинейного участка активной части режущей кромки и дуги $\cup F_1G_1$ радиусом r_{n1} , а ее координаты определяются по зависимостям:

$$X_{F1} = X_{E1}; \quad (12)$$

$$Y_{F1} = Y_{A1} - t_1, \quad (13)$$

где t_1 – глубина резания при работе первой ступени.

Точка G_1 режущей кромки является точкой сопряжения дуги $\cup G_1E_2$ и дуги $\cup G_1F_1$ окружности радиусом r_{n1} . Значение радиуса r_{n1} определяется из расчетной схемы по следующей формуле (рис. 3):

$$r_{n1} = \left[\frac{t_1 + R_2 - R_1}{\tan \varphi} - X_{O1} - Y_{A1} + t_1 + R_2 (1 - \cos \varphi_{1(2)}) + (X_{O1} - R_1 - -Y_{A1} + t_1 + R_2 + R_2 \cos \varphi_{1(2)}) \tan \varphi_{1(2)} \right] \tan \left(\frac{0,5\pi - \varphi_{1(2)}}{2} \right), \quad (14)$$

где значения координат X_{O1} и Y_{A1} определяются по зависимостям (1) и (4), а значение $\varphi_{1(2)}$ вспомогательного угла в плане на второй ступени задается.

Координаты точки O_{m1} центра окружности радиусом r_{n1} рассчитываются по формулам:

$$X_{rn1} = X_{O1} - R_1 - r_{n1}; \quad (15)$$

$$Y_{rn1} = Y_{O1} + R_1 - t_1. \quad (16)$$

Координаты точки G_1 определяются по следующим зависимостям:

$$X_{G1} = X_{O1} - R_1 - r_{n1} (1 + \sin \varphi_{1(2)}); \quad (17)$$

$$Y_{G1} = Y_{rn1} - r_{n1} \cos \varphi_{1(2)}. \quad (18)$$

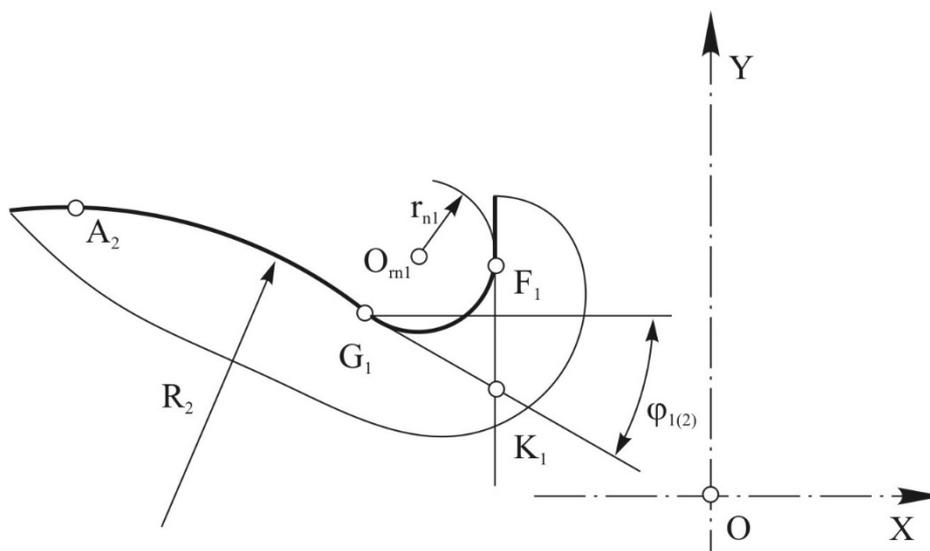


Рис. 3. Схема для расчета значения радиуса r_{n1} дуги $\cup G_1F_1$

Если форма второй и последующих ступеней повторяет форму первой ступени от точки A_1 до точки G_1 , координаты точек дискретного представления режущих кромок ступеней следующих за первой ступенью определяются с учетом того, что координата одноименной точки рассчитывается по следующим условиям;

$$X_{\text{точка } N} = X_{\text{точка } 1} - N \cos \frac{\beta}{2} \sum_{i=1}^N t_i ; \quad (19)$$

$$Y_{\text{точка } N} = Y_{\text{точка } 1} - N \sum_{i=1}^N t_i , \quad (20)$$

где N – номер ступени многоступенчатой режущей пластины.

Если форма ступеней, последующих за первой ступенью, не повторяет форму первой, расчет координат точек режущей кромки продолжается в следующем порядке.

Дуга $\cup F_1G_1$ выполняет функцию соединения режущей кромки первой ступени с режущей кромкой второй ступени, является их переходной частью. Криволинейная часть режущей кромки второй ступени сопрягается с переходной частью в точке G_1 . Криволинейная часть режущей кромки второй ступени задается точками G_1 , A_2 , C_2 и E_2 , которые принадлежат дуге $\cup G_1E_2$ окружности радиусом R_2 с центром в точке O_2 .

Координаты точек A_2 , O_2 , C_2 и E_2 рассчитывается по формулам:

для точки A_2

$$X_{A2} = \frac{t_1 + R_2 - R_1}{\tan \varphi} - X_{O1} ; \quad (21)$$

$$Y_{A2} = Y_{A1} - t_1 ; \quad (22)$$

для точки O_2

$$X_{O2} = X_{A2} ; \quad (23)$$

$$Y_{O2} = Y_{A1} - t_1 - R_2 ; \quad (24)$$

для точки C_2

$$X_{C2} = \frac{t_1 + R_2 - R_1}{\tan \varphi} - X_{O1} - R_2 \sin \varphi ; \quad (25)$$

$$Y_{C2} = Y_{O1} + R_1 - t_1 - R_2(1 - \cos \varphi) ; \quad (26)$$

для точки E_2

$$X_{E2} = \frac{t_1 + R_2 - R_1}{\tan \varphi} - X_{O1} - R_2 ; \quad (27)$$

$$Y_{E2} = Y_{O2} . \quad (28)$$

Координаты точки F_2 сопряжения прямолинейного участка активной части режущей кромки второй ступени и дуги $\cup F_2G_2$ радиусом r_{n2} , выполняющей функцию соединения с режущей кромкой третьей ступени, рассчитываются из выражений:

$$X_{F2} = \frac{t_1 + R_2 - R_1}{\tan \varphi} - X_{O1} - R_2 ; \quad (29)$$

$$Y_{F2} = Y_{A1} - t_1 - t_2 . \quad (30)$$

Расчет координат точек дискретного представления режущей кромки следующей ступени осуществляется по зависимостям (14) по (30).

Список литературы

1. Васин С.А. Проектирование сменных многогранных пластин. Методологические принципы. [Текст] / С.А. Васин, С.Я. Хлудов // М.: Машиностроение, 2006. 352 с.
2. Хлудов С.Я. Особенности проектирования многовершинной режущей пластины / А.С. Хлудов, М.О. Борискина, С.Я. Хлудов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. Вып. 8. Ч. 2. С. 44-49.
3. Хлудов А.С. Прогрессивные конструкции СМП / А.С. Хлудов, М.О. Борискина // VI молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»; сборник докладов под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Ядыкина Е.А.: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Ч.1. С. 28-29.
4. Хлудов В.С. Прогрессивные конструкции сменных многогранных пластин для чистового точения пластичных материалов [Текст]: автореферат дис. Тула, 2009. 22 с.

Хлудов Сергей Яковлевич, д – р техн. наук, профессор, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Борискина Маргарита Олеговна, аспирант, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Хлудов Алексей Сергеевич, аспирант, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DISCRETE PRESENTATION OF THE PROFILE OF THE CUTTING EDGE OF THE
MULTISTAGE CUTTING PLATE

S.Y. Khludov, M.O. Boriskina, A.S. Khludov

The Considered particularities of the designing the multistage cutting plate with discrete performance of the cutting edge for equipping turning incisor with mechanical fastening SMP for quick-and-dirty processing. As variant of the performance is considered cutting plate with cutting edge, executed on лекальной crooked "arc - a straight line - an arc", but all step cut alike on depth material.

Key words: scheme of the removing the material; the cutting edge, cutting plate, shaped curve.

Khludov Sergei Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Boriskina Margarita Olegovna, postgraduate, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Khludov Aleksey Sergeevich, postgraduate, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.2.082.18

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА
ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОФАЗНЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, И.В. Минаев, С.Н. Кутепов, А.А. Калинин

В работе представлены результаты исследования процесса фрикционного взаимодействия гетерофазных металлических систем на примере изучения трение верчения шара из стали ШХ15 по плоской поверхности призмы из порошковой стали 10P6M5-МП. Установлено, что в результате трения верчения по схеме «шар-плоскость», при установившемся режиме изнашивания, момент трения верчения также является установившимся. Показано, что момент трения верчения при изменении радиуса контакта фрикционных поверхностей вследствие износа вначале меняется нелинейно, но с определённого значения радиуса устанавливается. Данные закономерности неразрывно связаны с процессами уменьшения контактного давления и приработки, а также со степенью дисперсности, строением и состоянием структурных и фазовых составляющих.

Ключевые слова: процесс, трение верчения, износ, шар-плоскость, закон трения, сталь ШХ-15, сталь 10P6M5-МП, металлическая система.

Известно, что соприкосновение прижатых друг к другу реальных тел происходит всегда по некоторой площадке, размеры которой зависят от действующих нагрузок, материалов металлических систем тел

из которых они изготовлены, их структуры, свойств и других факторов. В частности, в случае контакта шара и пластины имеет место быть площадка в форме круга. Приведению одного из тел во вращение по другому телу препятствуют силы трения скольжения, распределенные по площадке соприкосновения и определяющие в своей совокупности так называемое трение верчения [1].

Совокупность этих сил может быть приведена к паре, которая уравновешивается парой, приложенной к телу и стремящейся повернуть его вокруг оси, перпендикулярной к площадке соприкосновения. Определение предельной величины момента пары трения верчения представляет собой сложную задачу, так как этот момент зависит от распределения давлений по площадке соприкосновения, а последние в свою очередь от формы поверхностей и упругих свойств прижатых друг к другу тел. Предельную величину момента трения верчения принимают пропорциональной прижимающей силе N и определяют формулой [1, 2]:

$$M_{тв}^{np} = f_{тв} \cdot N, \quad (1)$$

где $f_{тв}$ – коэффициент трения верчения, имеющий размерность длины; N – нормальная нагрузка; $M_{тв}^{np}$ – предельная величина момента трения верчения (установившееся значение момента в процессе трения). Коэффициент трения верчения в свою очередь зависит от коэффициента трения скольжения f .

Согласно теоретическим выводам академика Л.А. Галина в сложном случае соприкосновения тела, ограниченного поверхностью вращения, с телом, ограниченным плоской поверхностью, момент трения верчения определяется из соотношения [2]:

$$M_{тв}^{np} = \frac{3\pi}{16} \cdot f \cdot N \cdot a, \quad (2)$$

где a – радиус пятна контакта вследствие упругих деформаций; f – коэффициент трения скольжения.

Известно, что в случае контакта шара с упругим полупространством радиус области контакта можно приблизительно определить с использованием формулы Герца [3]:

$$a = \left(\frac{3NR}{4E^*} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где R – радиус шара, а E^* определяется из соотношения:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}, \quad (4)$$

где E_1 и E_2 – модули упругости (Юнга) для шара и тела ограниченного плоскостью соответственно; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона для шара и тела ограниченного плоскостью.

В границах данной работы исследован процесс трения верчения шара из стали ШХ15 по плоской поверхности призмы из порошковой стали 10Р6М5-МП. Радиус шара составлял $R \approx 6,35 \times 10^{-3}$ м. Модули упругости сталей принимались приблизительно равными $E_1 \approx E_2 \approx 2,1 \times 10^5$ МПа. Коэффициенты Пуассона также принимались приблизительно равными $\mu_1 \approx \mu_2 \approx 0,3$. Соответственно, при подстановке исходных данных в (4) имеем $E^* \approx 1,154 \times 10^5$ МПа.

Подставляя значения параметров в (3) получаем зависимость радиуса контакта от нормальной нагрузки тел из сталей ШХ15 и 10Р6М5-МП:

$$a = 3,456 \cdot 10^{-5} N^{1/3}. \quad (5)$$

Справедливость формул (3) и (5) можно принять в первом приближении при трении верчения покоя (отличаем от трения покоя при линейном предварительном смещении). При реализации трения верчения идёт процесс изнашивания и изменение радиуса контакта происходит в соответствии с закономерностью изнашивания во времени. В связи с этим изменение радиуса контакта при трении верчения шара по плоскости во времени может быть выражено следующим образом:

$$\begin{aligned} a_w(N,t) &= a + \Delta a(N,t) = \Delta a(N,t) + \left(\frac{3NR}{4E^*} \right)^{1/3} = \\ &= \Delta a(N,t) + 3,456 \cdot 10^{-5} N^{1/3} \end{aligned} \quad (6)$$

где $a_w(N,t)$ – радиус пятна износа; $\Delta a(N,t)$ – приращение радиуса контакта вследствие износа.

Необходимы экспериментальные исследования для выявления (6) а также проверки, закона (1) и его модификации (2) для трения верчения с изнашиванием шара из стали ШХ15 по плоской поверхности призмы из стали 10Р6М5-МП порошкового производства.

Материалы и методы исследования

Исследование в условиях трения верчения по схеме «шар – плоскость» осуществляли на машине трения ПБД-40 (рис.1, а).

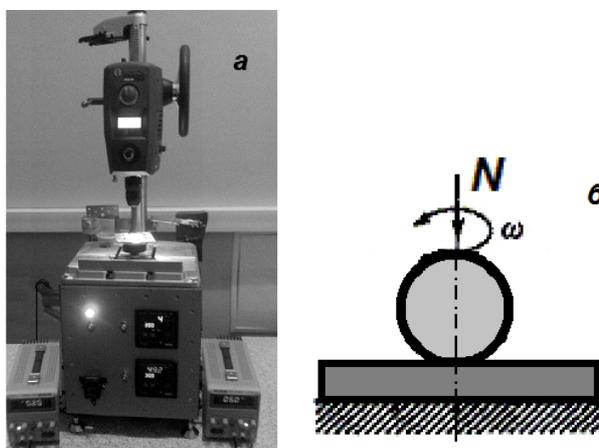


Рис. 1. Испытательное оборудование: а – машина трения ПБД-40; б – схема испытаний

В качестве вращающегося образца использовался шарик стали марки ШХ-15, диаметром 12,7 мм. В качестве неподвижного контртела использовалась прямоугольная призма из стали 10P6M5-МП. Образцы зажимались в специальную струбцину, трение осуществляли по грани призмы с наибольшей площадью. Перед началом испытания шар приводили в контактное взаимодействие с плоскостью образца согласно схеме (рис.1, б). Далее шар прижимался к призме с силами 145Н, 195Н и 235Н. Далее запускали движение шара, зажато в цанге с частотой вращения 850 об/мин. Время одного испытания при одной нагрузке составляло 600 с (10 мин). Момент трения фиксировался в процессе эксперимента с помощью осциллографа и записывался на компьютер. Радиусы пятна контакта измеряли с помощью микроскопа после завершения каждого испытания.

Результаты и их обсуждение

Зависимости радиуса пятна износа на шаре при разных нагрузках в зависимости от времени показаны на рис. 2.

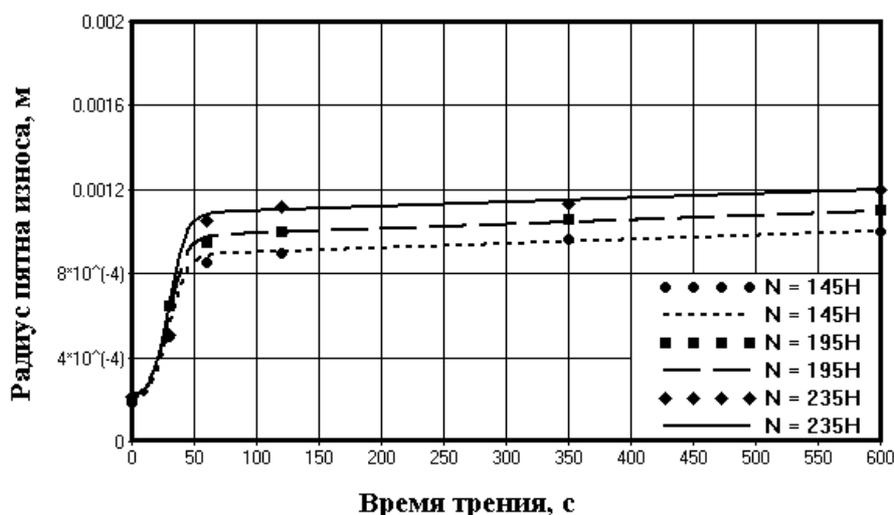


Рис. 2. Изменение радиуса контакта вследствие изнашивания

При нагрузке в 145 Н зависимость $a_w(t)$ аналитически выражается следующим образом:

$$a_w(t) = \frac{0,0000002t + 0,0007}{1 + \exp(-0,14(t - 30))} + (1,81 \cdot 10^{-4}). \quad (7)$$

При нагрузке в 195 Н зависимость $a_w(t)$ аналитически выражается следующим образом:

$$a_w(t) = \frac{0,0000002t + 0,00077}{1 + \exp(-0,14(t - 30))} + (2 \cdot 10^{-4}). \quad (8)$$

При нагрузке в 235 Н зависимость $a_w(t)$ аналитически выражается следующим образом:

$$a_w(t) = \frac{0,0000002t + 0,000865}{1 + \exp(-0,14(t - 30))} + (2,14 \cdot 10^{-4}). \quad (9)$$

Вторые слагаемые в (7) – (9) есть результаты расчёта по формулам (3) – (5), а первые слагаемые определены экспериментальными данными по пятну износа на шаре.

Зависимость $M_{тв}(t)$ – момента трения верчения от времени, при нагрузке 145Н приведена на рис. 3.

При нагрузке в 145 Н зависимость $M_{тв}(t)$ аналитически выражается следующим образом:

$$M_{тв}(t) = \frac{0,0285}{1 + \exp(-0,12(t - 35))}. \quad (10)$$

Зависимость момента трения верчения от времени при нагрузке 195Н приведена на рис. 4.

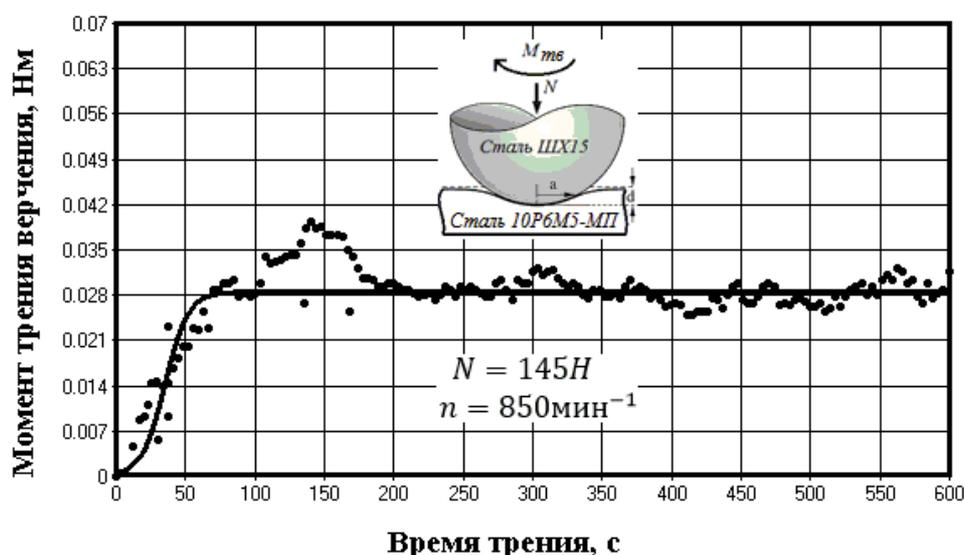


Рис. 3. Зависимость момента трения верчения от времени при нагрузке 145Н

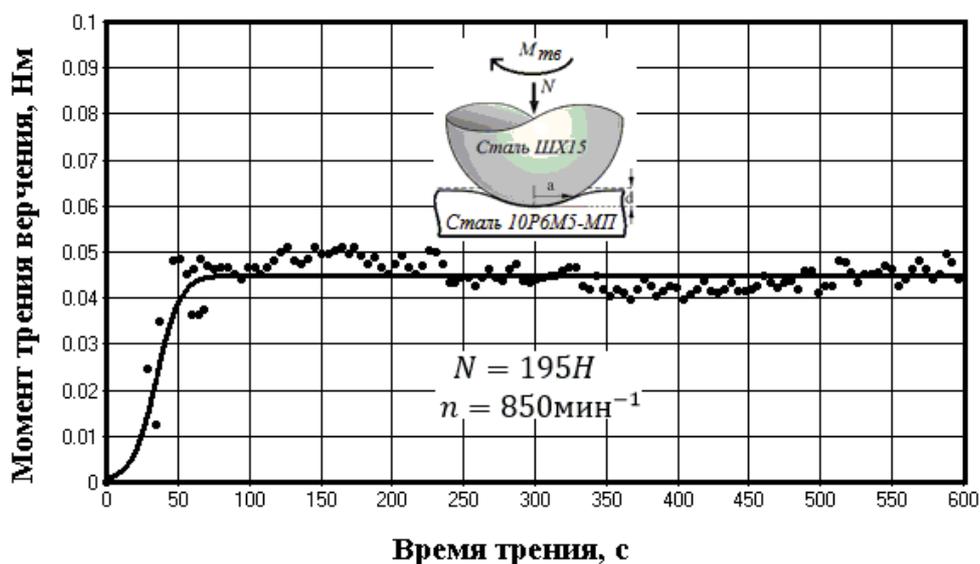


Рис. 4. Зависимость момента трения верчения от времени при нагрузке 195Н

При нагрузке в 195 Н зависимость $M_{тв}(t)$ аналитически выражается следующим образом:

$$M_{тв}(t) = \frac{0,045}{1 + \exp(-0,12(t - 35))}. \quad (11)$$

Зависимость момента трения вращения от времени при нагрузке 235Н приведена на рис. 5.

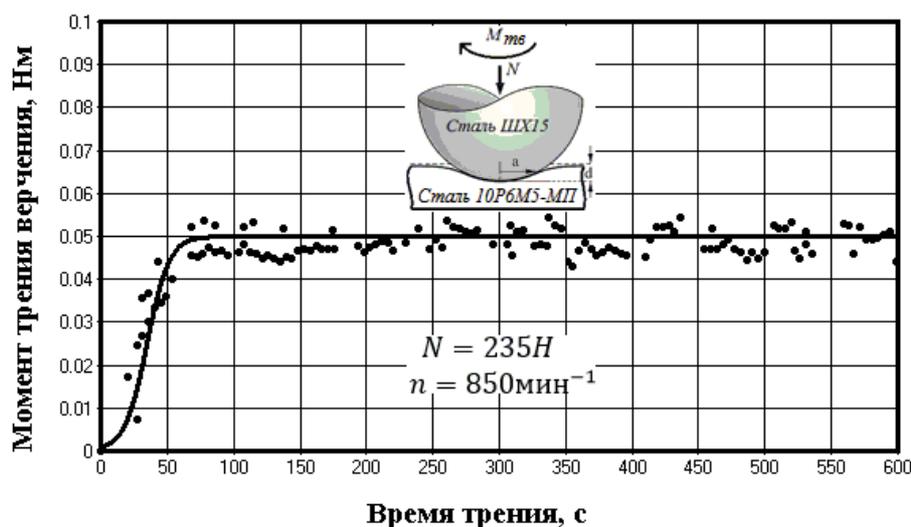


Рис. 5. Зависимость момента трения вращения от времени при нагрузке 235Н

При нагрузке в 235Н зависимость $M_{тв}(t)$ аналитически выражается следующим образом:

$$M_{тв}(t) = \frac{0,05}{1 + \exp(-0,12(t - 35))}. \quad (12)$$

В результате анализа (7) – (9) зависимость $a_w(N, t)$ аналитически можно выразить (в пределах нашего диапазона нагрузок) следующим образом:

$$a_w(N, t) = \frac{0,0000002t + (5,6 \cdot 10^{-5}) \cdot \sqrt{N}}{1 + \exp(-0,14(t - 30))} + 3,456 \cdot 10^{-5} N^{1/3}. \quad (13)$$

График зависимости радиуса пятна износа от нагрузки и времени (функции (13)) приведён на рис. 6.

Зависимость $M_{тв}(N, t)$ аналитически можно выразить (в пределах нашего диапазона нагрузок) следующим образом:

$$M_{тв}(N, t) = \frac{(2,21 \cdot 10^{-4}) \cdot N}{1 + \exp(-0,12(t - 35))}. \quad (14)$$

График функции (14) приведён на рис. 7.

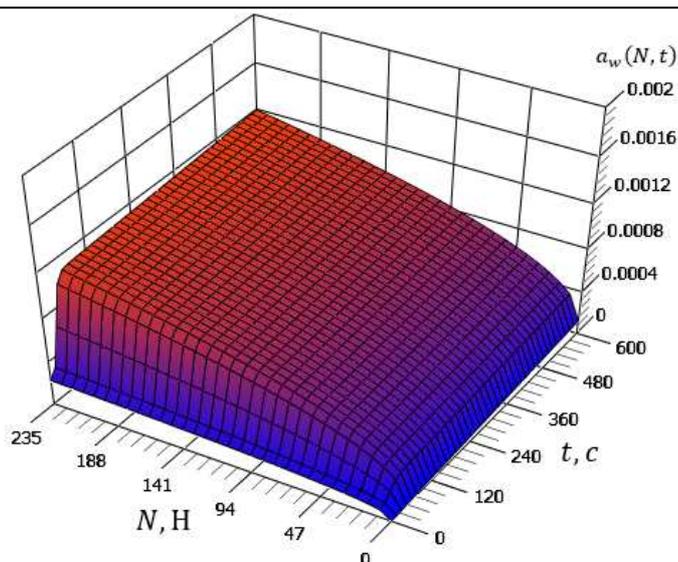


Рис. 6. График зависимости радиуса пятна износа (контакта) от нагрузки и времени

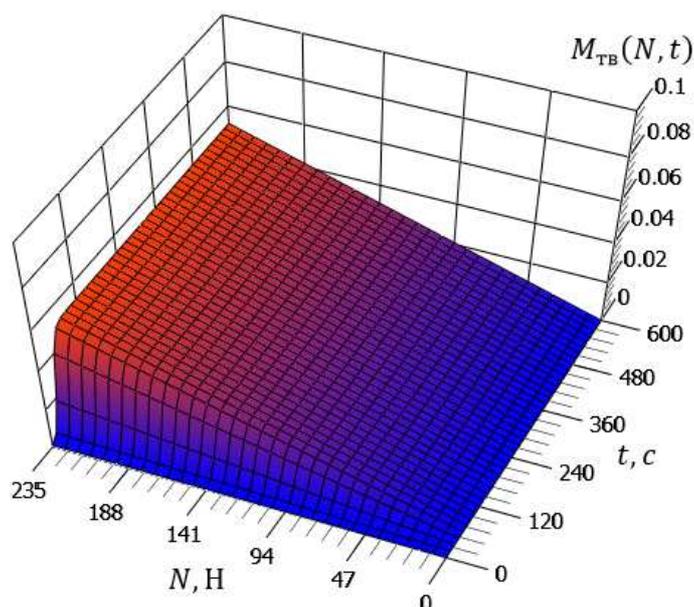


Рис. 7. График зависимости момента трения вращения от нагрузки и времени фрикционного взаимодействия

В формулах (10), (11) и (12) в числителях приведены значения, так называемого установившегося момента трения вращения. А в числителе формулы (14) приведена зависимость установившегося момента трения вращения от нормальной нагрузки:

$$M_{тв}^{np}(N) = (2,21 \cdot 10^{-4})N. \quad (15)$$

График функции (15) показан на рис. 8, из которого видно, что на выбранном диапазоне нагрузок полученные значения установившегося момента трения вращения хорошо аппроксимируется законом (1).

Соответственно коэффициент трения вращения равен $f_{me} = 2,21 \times 10^{-4}$ м. Согласно соотношению (2), выведенному теоретически академиком Л.А. Галиным, установившийся момент трения вращения пропорционален как нагрузке, так и радиусу пятна контакта [2].

В результате оцифровки зависимостей (7) – (9) и (10) – (12), и постановке в соответствие значений радиусов пятен контакта (пятен износа на шаре) значениям моментов трения вращения, полученных в одни и те же моменты времени, определены зависимости момента трения от радиуса контакта при нагрузках 145 Н, 195 Н и 235 Н.

Графики зависимостей момента трения вращения шара из стали ШХ15 по призме из стали 10P6M5-МП от радиуса контакта при нагрузках 145 Н, 195 Н и 235 Н, приведены на рис.9.

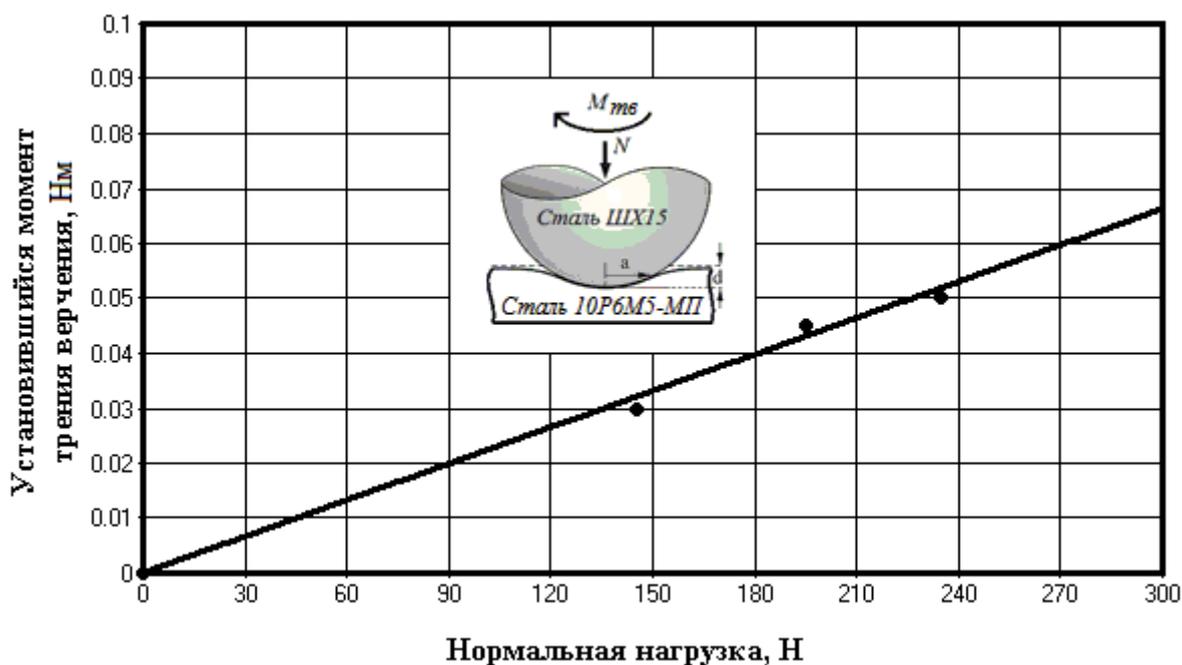


Рис. 8. График зависимости предельного (установившегося) момента трения вращения от нагрузки

При нагрузке в 145 Н зависимость $M_{тр}^{np}(a_w)$ аналитически выражается следующим образом:

$$M_{тр}^{np}(a_w) = \frac{0,0285}{1 + \exp(-10500(a_w - 0,0006))}. \quad (16)$$

При нагрузке в 195 Н зависимость $M_{тр}^{np}(a_w)$ аналитически выражается следующим образом:

$$M_{тр}^{np}(a_w) = \frac{0,045}{1 + \exp(-10500(a_w - 0,0006))}. \quad (17)$$

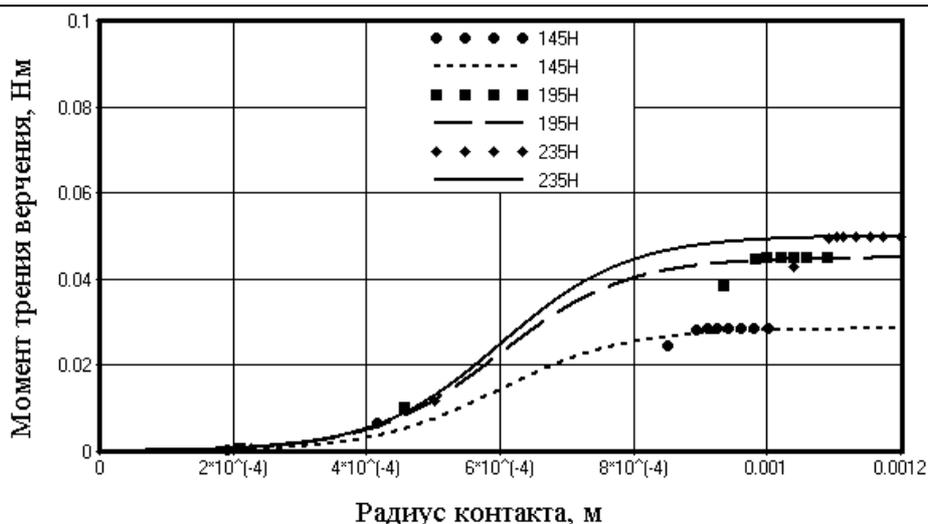


Рис. 9. Изменение момента трения вращения в зависимости от радиуса контакта (пятна износа) шара с плоскостью

При нагрузке в 235 Н зависимость $M_{тр}^{np}(a_w)$ аналитически выражается следующим образом:

$$M_{тр}^{np}(a_w) = \frac{0,05}{1 + \exp(-10500(a_w - 0,0006))}. \quad (18)$$

С учетом зависимостей (16) – (18), зависимость момента трения вращения шара из стали ШХ15 по призме из стали 10P6M5-МП от нагрузки и радиуса контакта имеет следующий вид:

$$M_{тр}^{np}(N, a_w) = \frac{(2,21 \cdot 10^{-4})N}{1 + \exp(-10500(a_w - 0,0006))}. \quad (19)$$

График функции (19) приведён на рис. 10.

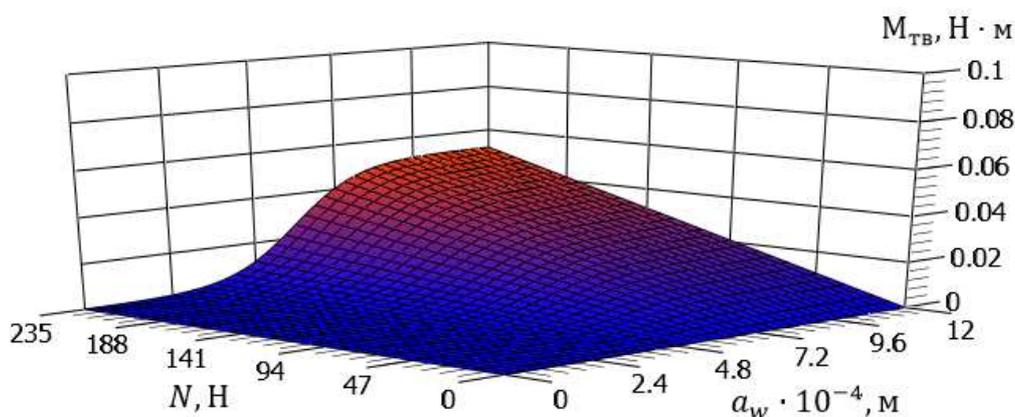


Рис. 10. График зависимости момента трения вращения от нагрузки и радиуса контакта

Полученная зависимость (19) показывает более сложное изменение момента трения верчения по сравнению с (2). С другой стороны, соотношение (1) справедливо, как показано выше (рис.7), при трении верчения шара из стали ШХ15 по призме из стали 10P6M5-МП в выбранном диапазоне нагрузок.

Выводы

На основании проведённого исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Исследован процесс фрикционного взаимодействия гетерофазных металлических систем на примере трения верчения шара из конструкционной шарикоподшипниковой стали ШХ15 по плоской поверхности призмы из порошковой высоколегированной инструментальной стали 10P6M5-МП.

2. Построены математические модели характеристик процесса фрикционного взаимодействия: радиуса пятна износа от времени и момента трения верчения от времени при различных нагрузках и установлены закономерности поведения данных характеристик от времени в процессе изнашивания.

3. Установлено, что при установившемся режиме изнашивания момент трения верчения также является установившимся.

4. Выявлено, что изменение момента трения верчения от нагрузки имеет линейный вид, подобный закону Г. Амонтона, что говорит об отсутствии явлений схватывания второго рода в выбранном диапазоне нагрузок.

5. Показано, что момент трения верчения при изменении радиуса контакта вследствие износа вначале меняется нелинейно, но с определённого значения радиуса устанавливается. Это связано с процессами уменьшения контактного давления и приработки, а также зависит от дисперсности, строения и состояния структурных и фазовых составляющих металлических систем.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих технологий обработки металлических материалов с использованием новых наноконпозиционных смазок и покрытий [4-42].

Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики: В 2-х томах. Т. I. Статика и кинематика. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 352 с.

2. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 304 с.

3. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352с.

4. Гетерогенное зарождение графита в углеродистых сталях при распаде цементита в процессе ТЦО вблизи точки A_0 / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2013. № 10. С. 48-52.

5. Влияние элементов графитизаторов на распад цементита при термоциклической обработке вблизи A_0 углеродистых сталей / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2013. № 11. С. 43-45.

6. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 39-42.

7. Условия проявления нестабильности цементита при термоциклировании углеродистых сталей / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, М.Е. Пруцков // Материаловедение. 2014. № 10. С. 31-36.

8. Особенности протекания процессов разупрочнения при горячей деформации алюминия, меди и их сплавов / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.Н. Боголюбова, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.А. Провоторов // Материаловедение. 2014. № 6. С. 48-55.

9. Влияние разнотерности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2014. № 7. С. 23-26.

10. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

11. Синтез и триботехнические свойства композиционных покрытий с матрицей из полиамида ПМ-ДАДФЭ и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Материаловедение. 2015. № 12. С. 36-40.

12. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов / А.Е. Гвоздев, И.В. Голышев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.М. Хонелидзе, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 2. С. 31-36.

13. Постановка задачи расчета деформационной повреждаемости металлов и сплавов / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 10. С. 18-26.

14. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

15. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // Технология металлов. 2015. № 11. С. 17-29.

16. Зависимость показателей сверхпластичности труднодеформируемых сталей Р6М5 и 10Р6М5-МП от схемы напряженного состояния / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.Н. Боголюбова // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 11. С. 42-46.

17. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation // A.E. Gvozdev, D.N. Bogolyubova, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 1. P. 32-40.

18. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels / A.E. Gvozdev, I.V. Minaev, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 1. P. 41-44.

19. Role of nucleation in the of first-order phase transformations / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 4. P. 283-288.

20. Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets / A.E. Gvozdev, I.V. Golyshv, I.V. Minayev, A.N. Sergeev, N.N. Sergeev, I.V. Tikhonova, D.M. Khonelidze, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 4. P. 305-310.

21. Использование обобщенного треугольника Паскаля для описания колебаний силы трения материалов / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2016. № 11. С. 3-8.

22. Синтез и триботехнические свойства композиционного покрытия с матрицей из полиимида (Р-ООО) ФТ и наполнителем из наночастиц дисульфида вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков, Ю.А. Фадин // Материаловедение. 2016. № 4. С. 44-48.

23. Композиционные покрытия на основе полиимида А-ООО и наночастиц WS_2 с повышенными триботехническими характеристиками в условиях сухого трения скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков, Ю.А. Фадин, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2016. № 5. С. 41-44.

24. О фрикционном взаимодействии металлических материалов с учетом явления сверхпластичности / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.М. Хонелидзе // *Материаловедение*. 2016. № 8. С. 21-25.

25. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // *Материаловедение*. 2016. № 9. С. 3-7.

26. Вытяжка с утонением анизотропного упрочняющего материала / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // *Производство проката*. 2016. № 4. С. 5-10.

27. Вариант расчета максимального упрочнения малоуглеродистых сталей в процессах пластической деформации / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // *Производство проката*. 2016. № 7. С. 9-13.

28. Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев // *Технология металлов*. 2016. № 1. С. 23-32.

29. Исследование изнашивания стали ШХ15 в среде пластичных смазочных композиционных материалов, содержащих дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, Ю.А. Фадин, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев, С.Е. Александров, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.В. Малий // *Технология металлов*. 2016. № 7. С. 9-15.

30. Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM-DADPE polyimide matrix and fillers on tungsten dechalcogenide nanoparticles upon dry sliding friction / A.D. Breki, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, A.G. Kolmakov, N.N. Sergeyev, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, Y.A. Fadin // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Т. 7. № 4. P. 542-546.

31. Триботехнические свойства композиционного материала «алюминий-углеродные нановолокна» при трении по сталям 12Х1 и ШХ15 / А.Д. Бреки, Т.С. Кольцова, А.Н. Скворцова, О.В. Толочко, С.Е. Александров, А.Г. Колмаков, А.А. Лисенков, А.Е. Гвоздев, Ю.А. Фадин, Д.А. Провоторов // *Материаловедение*. 2017. № 11. С. 37-42.

32. Формирование пластических зон около сферической полости в упрочненных низкоуглеродистых сталях в условиях водородной стресс-коррозии / Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, А.Н. Чуканов, А.Г. Колмаков, А.А. Яковенко, А.Н. Сергеев, И.М. Леонтьев, Д.М. Хонелидзе, А.Е. Гвоздев // *Материаловедение*. 2017. № 12. С. 18-25.

33. Противоизносные свойства пластичных смазочных композиционных материалов «Литол-24-частицы гидросиликатов магния» / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, С.Е. Александров, Д.А. Провоторов // *Материаловедение*. 2017. № 3. С. 38-42.

34. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // *Материаловедение*. 2017. № 7. С. 11-22.

35. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon // A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

36. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

37. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtse, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 32-36.

38. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 56-59.

39. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. Application of generalized Pascal triangle for description of oscillations of friction forces // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 4. С. 509-514.

40. Антифрикционные свойства плазмохимических покрытий на основе SiO₂ с наночастицами MoS₂ в условиях трения верчения по стали ШХ15 / А.Д. Бреки, С.Е. Александров, К.С. Тюриков, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев, А.А. Калинин // *Материаловедение*. 2018. № 1. С. 31-35.

41. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. I (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // *Материаловедение*. 2018. № 3. С. 27-33.

42. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. II (обзор) / Сергеев Н.Н., А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // *Материаловедение*. 2018. № 4. С. 20-29.

Бреки Александр Джалюльевич, канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой МиОК, с.н.с. лаборатории ИЭС, albreki@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт проблем машиноведения РАН,

Гвоздев Александр Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, gvozdev.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Минаев Игорь Васильевич, генеральный директор, ivminaev1960@yandex.ru, Россия, Тула, ООО НПП «Телар»,

Кутепов Сергей Николаевич, канд. пед. наук, kutepov.sergei@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Калинин Антон Алексеевич, инженер, antony-ak@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MATHEMATICAL MODELS OF CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF FRICTION INTERACTION OF HETERO-PHASE METALLIC SYSTEMS

A.D. Breki, A.E. Gvozdev, I.V. Minaev, S.N. Kutepov, A.A. Kalinin

The paper presents the results of the investigation of the friction interaction of heterophase metal systems using the example of studying the friction of the ball of steel ShKh15 on a flat surface of a prism made from powder steel 10P6M5-MP. It is established that as a result of the friction of the "ball-plane" rotation, under the steady wear regime, the frictional torque is also steady. It is shown that the frictional friction moment when changing the contact radius of frictional surfaces due to wear changes at first nonlinearly, but from a certain radius value is established. These regularities are inextricably linked with the processes of reducing contact pressure and run-in, as well as with the degree of dispersion, structure and state of the structural and phase components.

Key words process, the pivoting friction, wear, ball-plane, the law of friction, steel ShKh15 steel 10P6M5-MP, the metal system.

Breki Alexander Dzhalyulyevich, candidate of technical science, associate professor., deputy department chair of MIOK, senior research associate of IES laboratory, albreki@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Institute of problems of engineering science of RAS.,

Gvozdev Aleksandr Evgen'yevich, doctor of technical science, professor, gvozdev.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Minaev Igor' Vasil'yevch, General Director, ivminaev1960@yandex.ru, Russia, Tula, LLC "NPP "Telar",

Kutepov Sergey Nikolaevich, candidate of pedagogical science, kutepov.sergei@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Kalinin Anton Alekseevich, engineer, antony-ak@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ЛУНОК ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ МИКРООБРАБОТКЕ

Т.З. Нгуен, В.М. Волгин

Работа посвящена теоретическому изучению процесса формообразования обрабатываемой поверхности при коротких импульсах. Проведено математическое моделирование эволюции обрабатываемой поверхности в процессе электроэрозионной микрообработки с помощью замещения материала заготовки анизотропным материалом с малой теплоемкостью. Исследовано влияние энергии и длительности импульсов на геометрические характеристики эрозионных лунок. Полученные результаты позволяют прогнозировать производительность и шероховатость поверхности при электроэрозионной микрообработке.

Ключевые слова: моделирование электроэрозионной микрообработки, эрозионная лунка, канал разряда, эволюция обрабатываемой поверхности.

Метод электроэрозионной обработки (ЭЭО) является одним из самых распространенных методов обработки высокотвердых материалов, получения фасонных поверхностей и положен в основу большинства технологических процессов как в серийном, так и в массовом производстве. Одним из видов традиционной ЭЭО является электроэрозионная микрообработка (ЭЭМО), используемая для изготовления трехмерных сложных микрообъектов и микроструктур с высокой точностью.

В последние годы ряд технологических задач промышленности требуется для своего решения обработки деталей с размерами меньше 100 мкм и высотой микронеровностей менее 1 мкм. Показатели качества поверхностного слоя, формируемые при ЭЭМО, определяются механизмом съема материала. Удаление материала происходит в основном за счет электрической энергии, подаваемой в межэлектродный промежуток (МЭП) между электродом инструментом (ЭИ) и заготовкой, без силового воздействия на заготовку. Следующие друг за другом импульсные разряды, производят выплавление и испарение микрочастиц материала с поверхности заготовки в окружающую рабочую жидкость. Вследствие импульсивного точечно-поверхностного подвода энергии после ЭЭМО поверхность приобретает характерные неровности в виде совокупности «наложенных» друг на друга лунок (рис. 1). В связи с этим радиус $r_{л}$, глубина $h_{л}$ лунки и их соотношение, характеризующееся коэффициентом $K = r_{л}/h_{л}$, оказывает существенное влияние на параметры шероховатости поверхности [1]. Глубина лунки, высота микронеровностей и глубина термически измененного слоя зависят от теплового процесса, которые на электродах определяют производительность, износ ЭИ и свойства поверхностного слоя заготовки.

Таким образом, для повышения точности и снижения шероховатости поверхности, возможности обработки микрообъектов тесно связаны со снижением объема эрозионной лунки, а, следовательно, с уменьшением энергии разряда и его длительности [2].

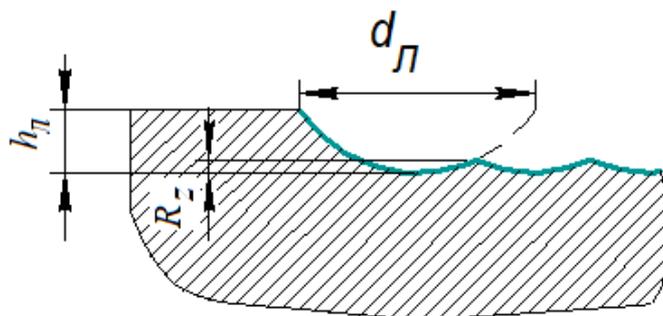


Рис. 1. Профиль поверхности после электроэрозионной обработки

Формированию канала разряда и единичной лунки посвящено большое количество работ, в большинстве из которых используются допущения о геометрической и энергетической однородности поверхности. При этом исходная поверхность заготовки принимается плоской, а механизм удаления материала с обрабатываемой поверхности задается, либо принимается, что размер лунки совпадает с зоной температуры плавления (рис. 2, а), либо быстрое удаление материала с помощью абляции (рис. 2, б). К основным недостаткам этих методов является невозможность учитывать геометрическую и энергетическую неоднородности электродов и моделировать процесс из нескольких последовательных разрядов.

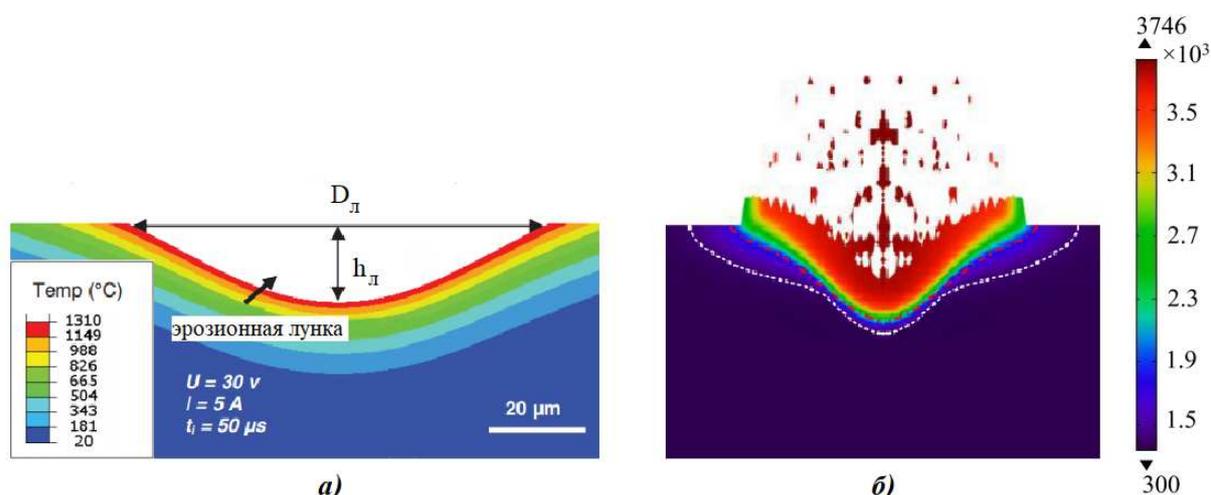


Рис. 2. Схемы традиционных подходов моделирования ЭЭМО: а – размер лунки совпадает с изотермой плавления [3]; б – удаление материала с помощью абляции [4]

Для моделирования процесса формирования эрозионных лунок при ЭЭМО была разработана математическая модель, включающая в себя модель тепловых процессов для единичного импульса и модель удаления металла с поверхности заготовки.

Одна из сложностей моделирования ЭЭМО связана с необходимостью изменения формы и размеров обрабатываемой заготовки после импульса. Эта сложность может быть устранена, если считать, что в процессе обработки удаленный материал заготовки заменяется анизотропным материалом с малой теплоемкостью, причем теплопроводность этого материала вдоль канала разряда много больше, чем теплопроводность в направлении перпендикулярном каналу разряда (рис. 3). Такой подход был использован для моделирования лазерной резки и показал высокую эффективность [5].

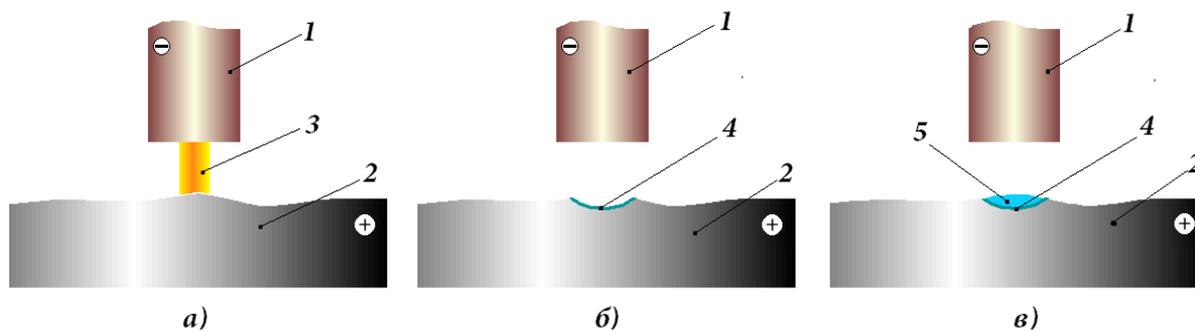


Рис. 3. Схемы моделирования ЭЭО: а – до начала образования лунки; б – традиционный подход с удалением материала заготовки; в – предлагаемый подход, в котором материал заготовки заменяется анизотропным материалом с малой теплоемкостью; 1 – ЭИ; 2 – заготовка; 3 – канал разряда; 4 – эрозионная лунка; 5 – анизотропный материал

Для моделирования тепловых процессов при ЭЭМО использовано дифференциальное уравнение теплопроводности без учета внутреннего источника задается выражением [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = \text{div}(k \text{grad} T), \quad (1)$$

где T – температура; ρ – плотность материала электрода; k – коэффициент теплопроводности; C_p – теплоемкость.

Радиус плазменного канала является важным параметром при моделировании тепловых процессов в ЭЭМО. Очевидно, что радиус плазменного канала увеличивается в течение разряда. Радиус плазменного канала зависит от различных параметров, например, материала электрода, величины тока в импульсе, времени и т.д.

Исследованию закономерностей изменения радиуса плазменного канала посвящено большое количество работ, в большинстве из которых предлагается формула для оценочного расчета радиуса плазменного канала [7,8]:

$$R_p = C t_{on}^n, \quad (2)$$

где C и n – коэффициенты, зависящие от режима обработки и свойства материала, t_{on} – длительность импульса.

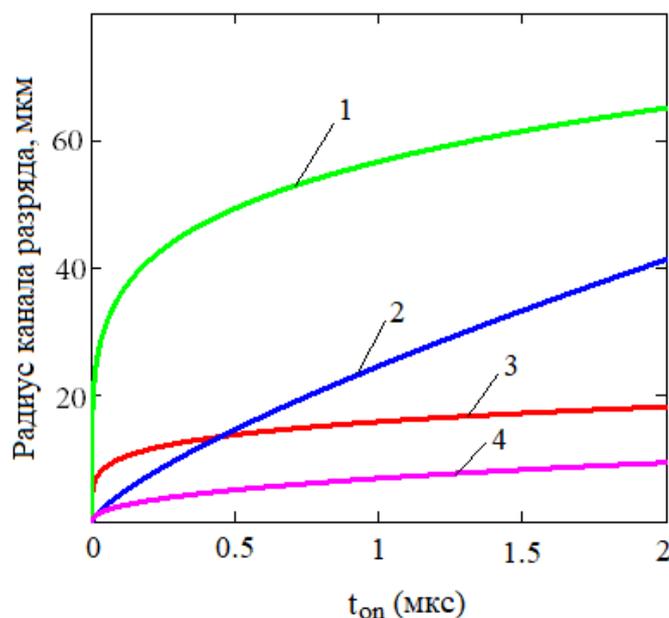


Рис. 4. Зависимости радиуса канала электрического разряда от длительности импульса (при энергии импульса $W_u = 14$ мкДж):

$$1 - R_p = 9 \cdot 10^{-4} t_{on}^{0.2}; \quad 2 - R_p = 0.788 t_{on}^{0.75}; \quad 3 - R_p = 2.51 \cdot 10^{-4} t_{on}^{0.2};$$

$$4 - R_p = 2.04 \cdot 10^{-3} I^{0.43} t_{on}^{0.44}$$

Разные исследователи предлагают различные значения показателя n : в работе [8] использовано значение $n = 0.2$, а в работе [9] и ряде других работ предлагают использовать значение $n = 0.75$.

Однако, в работе [10] предлагается более общая формула для оценочного расчета радиуса плазменного канала:

$$R_p = 2.4 \cdot 10^{-3} I^{0.43} t_{on}^{0.44} \quad (3)$$

Распределение теплового потока по радиусу канала разряда определяется по формуле:

$$q(x) = q_0 \exp\left(-4.5 \left(\frac{x - x_0}{R_p}\right)^2\right), \quad (4)$$

где q_0 – максимальный тепловой поток.

При $x_0 = 0$, максимальный тепловой поток можно рассчитать по следующему соотношению:

$$q_0 = \frac{4.55\eta E}{\pi R^2 t_{on}}, \quad (5)$$

где x – координата, характеризующая расстояние от центра канала электрического разряда; $E = Ut_{on}$ – энергия импульса; I – ток; U – напряжение пробоя, η – доля энергии импульса, поглощаемая заготовкой.

В результате воздействия каждого разряда происходит удаление материала заготовки, который замещается анизотропным материалом, характеристики которого задаются следующими соотношениями:

$$k^* = \begin{bmatrix} k/P & 0 \\ 0 & k \cdot P \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$C_p^* = C_p / P, \quad (7)$$

где P – коэффициент, характеризующий свойства анизотропной среды.

В отличие от лазерной обработки с непрерывным излучением, когда температура в ходе процесса монотонно увеличивается, при электроэрозионной обработке температура во время паузы уменьшается. Такое немонотонное изменение температуры не позволяет использовать значение температуры для определения границы лунки, как это было принято при моделировании лазерной обработки. Поэтому был использован подход, базирующийся на введении вспомогательной функции, значение которой с течением времени изменяется монотонно:

$$\frac{du}{dt} = 1(T - T^*) \cdot 1(\bar{t} - \bar{t}^*), \quad (8)$$

где $1(T - T^*) = \begin{cases} 0 & \text{при } T < T^* \\ 1 & \text{при } T \geq T^* \end{cases}$ – единичная функция; T^* – температура, при которой происходит удаление материала заготовки (принималась равной температуре плавления или температуре испарения); $\bar{t} = t - t_i$ – время, отсчитываемое от начала i -го импульса; $t_i = (i-1)t_{пер}$ – время начала i -го импульса; $t_{пер}$ – период следования импульсов; \bar{t}^* – характерное время начала удаления материала с заготовки в i -ом импульсе, отсчитываемое от начала i -го импульса.

В зависимости от условий обработки удаление материала с заготовки происходит либо в жидком, либо в газообразном состоянии. Причем в первом случае расплавленный металл удаляется из лунки после окончания импульса, а во втором случае удаление материала происходит и во время импульса, если температура превышает температуру испарения. С учетом

этого параметр \bar{t}^* принимался равным длительности импульса при удалении металла в жидком состоянии и равным нулю при удалении металла в газообразном состоянии.

Начальное условие для функции принималось равным нулю, то есть:

$$u(x, y, 0) = 0. \quad (9)$$

По значению функции $u(x, y, t)$ определялись свойства среды:

$$\bar{k} = \begin{cases} k, & u < \varepsilon \\ k^*, & u \geq \varepsilon \end{cases}; \quad (10)$$

$$\bar{C}_p = \begin{cases} C_p, & u < \varepsilon \\ C_p^*, & u \geq \varepsilon \end{cases}, \quad (11)$$

где ε - малый параметр, характеризующий точность определения границы обработанной поверхности.

Граница обработанной поверхности в любой момент времени задается следующим неявным уравнением:

$$u(x, y, t) = \varepsilon. \quad (12)$$

Использование соотношений (8) – (12) позволяет моделировать удаление материала с заготовки без изменения геометрии расчетной области.

Определение месторасположения очередного разряда с учетом энергетической неоднородности обрабатываемой поверхности производилось на основе анализа напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. При этом положение очередного разряда по оси x определялось по расположению точки, в которой модуль напряженности электрического поля $\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi$ имел наибольшее значение:

$$x_i = x^*, \quad E^*(x^*, y^*, t_i) = \max_{x, y} (|\mathbf{E}(x, y, t_i)|), \quad (13)$$

где x_i - точка, в которой происходит i -ый разряд; φ - потенциал электрического поля.

Расчет электрического поля производился с использованием уравнения Лапласа:

$$\text{div}(\bar{\sigma} \text{grad}\varphi) = 0, \quad (14)$$

где $\bar{\sigma}$ - относительная удельная электропроводность.

При расчете распределения электрического поля принималось, что поверхность ЭИ является плоской и отстоит от исходной поверхности обрабатываемой заготовки на величину МЭП s . Так как в явном виде обрабатываемая поверхность не выделялась, то решение уравнения (14) осуществлялось как в межэлектродном промежутке, так и обрабатываемой за-

готовке. При этом учет фактического положения обрабатываемой поверхности осуществлялся за счет зависимости относительной электропроводности от расположения точки в заготовке:

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} 1, & u \geq \varepsilon \\ P, & u < \varepsilon \end{cases} \quad (15)$$

Значение $\bar{\sigma}$ в межэлектродном пространстве за пределами заготовки принималось равным 1.

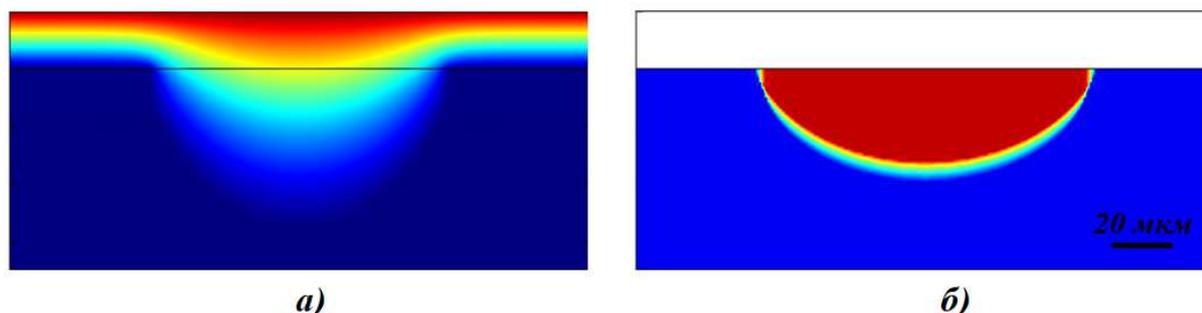


Рис. 5. Распределения потенциала (а) и вспомогательной функции, соответствующие моменту окончания импульса

На рис. 5 приведены распределения потенциала и вспомогательной функции, соответствующие моменту окончания первого периода. На рис. 5б область коричневого цвета соответствует лунке, полученной в результате действия импульса.

В исходном состоянии образец имеет прямоугольное сечение с размерами 30x10 мкм. Параметры режимов обработки приведены в табл.1, а теплофизические параметры исследуемых материалов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры режимов обработки [11]

Параметры	№1	№2	№3	№4
Длительность импульса t_{on} , нс	218	342	323	326
Ток импульса I, А	1.4	1.35	1.6	2.32
Энергия импульса, мкДж	14	21	21	26

В табл. 3 и на рис. 6 представлены сравнения результатов моделирования эрозионных лунок, полученные с использованием различных подходов. Результаты моделирования показали, что размеры лунок при предлагаемом подходе не сильно отличаются от результатов традиционных подходов.

Таблица 2

Теплофизические параметры исследуемых материалов [11,12]

Свойство	Материал заготовки	
	Ti-6Al-4V	Нержавеющая сталь (304)
Плотность, ρ (кг/м ³)	4420	7818
Коэффициент теплопроводности k (Вт/м.К)	7.2	16.26
Удельная теплоемкость – в твердом состоянии (Дж/кг.К)	560	500
Температура плавления, $T_{пл}$ (К)	1903	1808

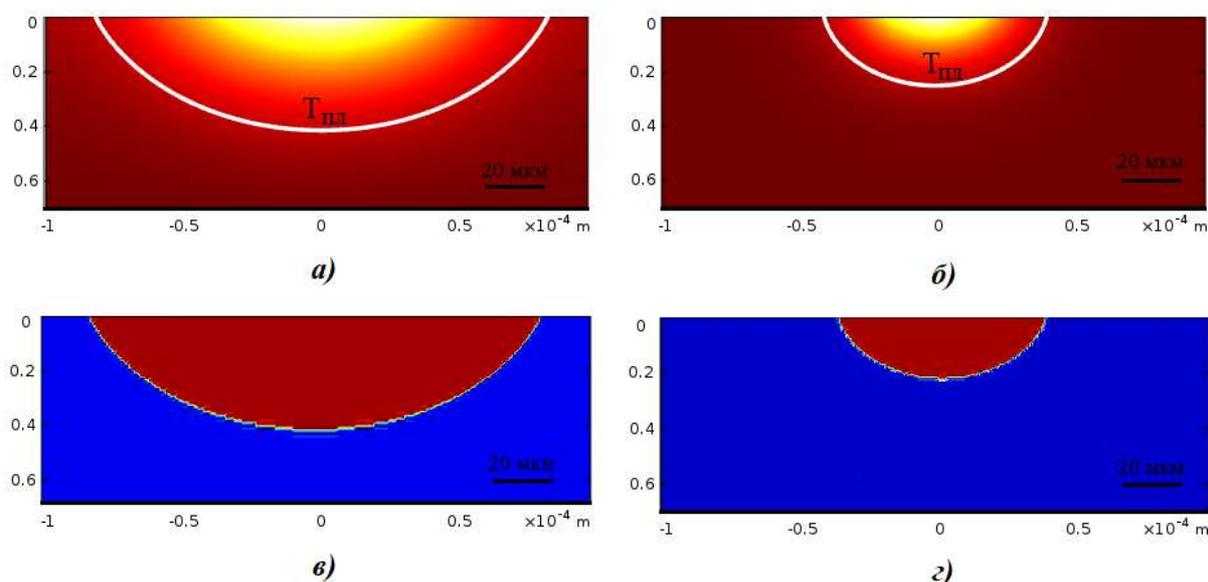


Рис. 6. Формы единичных эрозионных лунок при разных подходах: а и б – традиционный подход; в и г – предлагаемый подход; а и в – при энергии импульса $E = 60$ мкДж; б и г – при энергии импульса $E = 10$ мкДж

Таблица 3

Сравнения результатов моделирования эрозионных лунок при различных походах

№	Параметры режимов обработки (напряжение пробоя $U=50$ В)				Результаты традиционных подходов		Результаты предлагаемого подхода		$\frac{\Delta R}{R_l}$, %	$\frac{\Delta h}{h_l}$, %
	I, А	t_{on} , мкс	E, мкДж	η , %	R_l , мкм	h_l , мкм	R_l , мкм	h_l , мкм		
1	4	50	10	9.24	37.1	21.9	36.7	21.2	1.08	3.2
2	4	100	20	10.58	48.6	28.8	48.2	27.9	0.82	3.1

Окончание таблицы 3

№	Параметры режимов обработки (напряжение пробоя U=50 В)				Результаты традиционных подходов		Результаты предлагаемого подхода		$\frac{\Delta R}{R_l}$, %	$\frac{\Delta h}{h_l}$, %
	I, А	t_{on} , мкс	E, мкДж	η , %	R_l , мкм	h_l , мкм	R_l , мкм	h_l , мкм		
3	6	100	30	11.83	60.0	31.8	58.3	31.2	1.17	1.9
4	6	150	45	13.09	70.3	38.4	69.5	37.3	1.14	2.9
5	8	150	60	14.39	82.0	41.5	81.5	40.6	0.61	2.2

На рис. 7 представлены единичные эрозионные лунки при энергии импульса $W_u = 14$ мкДж.

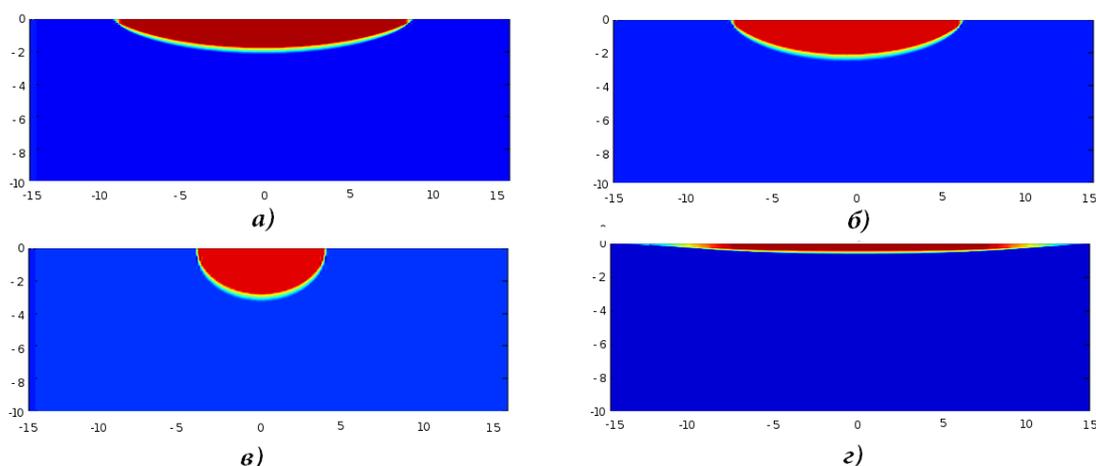


Рис. 7. Формы единичных эрозионных лунок при длительности импульса $t_{on} = 218$ нс и энергии импульса $W_u = 14$ мкДж:

а – $R_p = 2.51 \cdot 10^{-4} t_{on}^{0.2}$; б – $R_p = 0.788 t_{on}^{0.75}$; в – $R_p = 2.04 \cdot 10^{-3} I^{0.43} t_{on}^{0.44}$;
 г – $R_p = 9 \cdot 10^{-4} t_{on}^{0.2}$

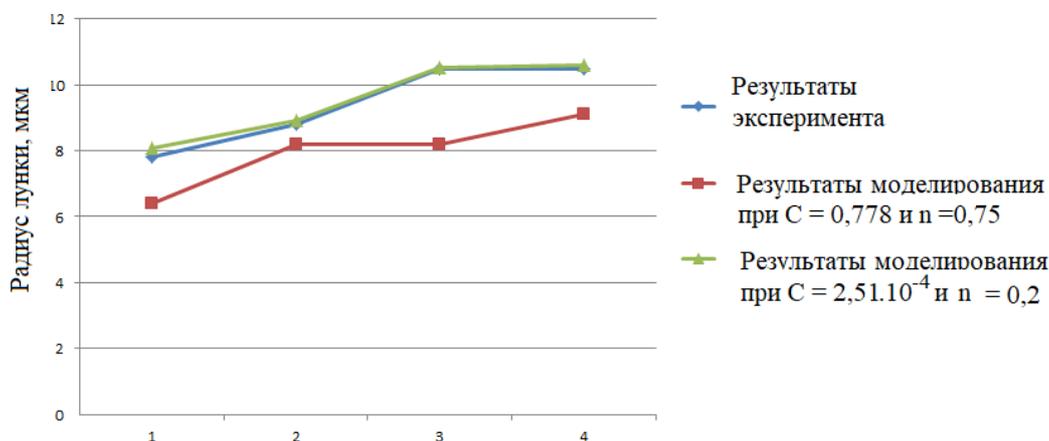


Рис. 8. Зависимость радиуса лунки от энергии импульса и длительности импульса

Только представленные на рис. 7, а, б результаты соответствуют литературным данным [5-11]. Полученные в результате моделирования зависимости радиуса лунок от энергии импульса и его длительности показывают, что наилучшее соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными обеспечивается при следующих значениях коэффициентов C и n : $C = 2.51 \cdot 10^{-4}$, $n = 0.2$ (рис. 8).

Список литературы

1. Артамонов Б.А. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1991. Ч. 2. 40 с.
2. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: учебное пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин. М.: Машиностроение, 2003. 512 с.
3. Liu J.F., Guo Y.B. Thermal Modeling of EDM with Progression of Massive Random Electrical Discharges // J. Procedia Manufacturing. 2016. V.5. P. 495–507.
4. Jiajing T., Xiaodong Y. Simulation investigation of thermal phase transformation and residual stress in single pulse EDM of Ti–6Al–4V // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V.51. P. 135308.
5. Tresansky A., Joyce P., Radice J., Watkins J. Numerical Modeling of High-Energy Laser Effects in Polymer and Composite Materials // Journal of Directed Energy. 2014. V.5(2). P. 137-158.
6. Patel M.R., Barrufet M.A., Eubank P.T., DiBitonto D.D. Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model // J Appl Phys. 1989. V. 66:4104–11.
7. Revaz B., Witz G., Flukiger R. Properties of the plasma channel in liquid discharges inferred from cathode local temperature measurements // Journal of Applied Physics. 2005. V.98. ArtNum:113305.
8. Izquierdo B., Sanchez J.A., Plaza S., Pombo I., Ortega N. A numerical model of the EDM process considering the effect of multiple discharges // Int. J. of Machine Tools & Manuf, 2009. P. 220-29.
9. Shuvra. Das, Mathias. Klotz EDM simulation: finite element based calculation of deformation, microstructure and residual stresses // Journal of Materials Processing Technology, 2003. V. 142. P. 434–451.
10. Joshi S.N., Pande S.S. Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process // Journal of Manufacturing Processes, 2010. V. 12. P. 45–56.
11. Hoang K.T., Satish Kumar Gopalan, Seung-Han Yang Study of energy distribution to electrodes in a micro-EDM process by utilizing the electro-thermal model of single discharges // Journal of Mechanical Science and Technology. 2015. V. 29 (1). P. 349–356.

12. Assarzadeh S., Ghoreishi M. Prediction of root mean square surface roughness in low discharge energy die-sinking EDM process considering the effects of successive discharges and plasma flushing efficiency // *J. of Manufacturing Processes*, 2017. V. 30. P. 502–515.

13. Somashekhar K.P., Panda S., Mathew J., Ramachandran N. Numerical simulation of micro-EDM model with multi-spark // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015. V. 76 (1-4). P. 83-90.

14. Yeo S., Kurnia W., Tan P. Electro-thermal modelling of anode and cathode in micro-EDM // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007. V. 40(8). P. 2513.

Нгуен Тхань Зиен, аспирант, poguha201@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Волгин Владимир Мирович, д-р техн. наук, профессор, volginvm@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MODELLING OF THE CRATER FORMATION AT ELECTRICAL DISCHARGE MICROMACHINING

V.M. Volgin, T.D. Nguyen

The work is devoted to a theoretical study of the process of shaping the surface to be treated when short impulses are applied. A mathematical modeling of the evolution of the surface to be treated on the Electrical Discharge MicroMachining (EDMM) process has been carried out by replacing the workpiece material with an anisotropic material with a low heat capacity. The influence of energy and pulse duration on the geometric characteristics of the erosion crater is studied. The results obtained make it possible to predict the surface roughness in the EDMM process.

Key words: modeling of EDMM process, erosion crater, discharge channel, evolution of the treated surface.

Nguyen Thanh Diem, postgraduate, poguha201@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Volgin Vladimir Mirovich, doctor of technical sciences, professor, volgin@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИ СВАРКЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Н. Гадалов, Е.В. Скрипкина, А.Г. Беседин,
А.Е. Гвоздев, С.Н. Кутепов, О.В. Пантюхин

Проанализированы различные физико-механические процессы, протекающие при образовании неразъемных соединений при сварке в твердой фазе различных металлических гетерофазных материалов, полученных порошковой металлургией. Рассмотрены явления поверхностной, граничной и объемной диффузии в железных сплавах с карбидным упрочнением. Приведены параметры самодиффузии углерода и железа в сплавах – химических соединениях различного стехиометрического состава. Обсуждается аналитическое выражение, включающее параметры диффузии легирующих компонентов и значения их концентрации в металлических системах, используемое для установления закономерностей развития процессов формирования соединения при твердофазной сварке. Результаты могут быть использованы в ресурсосберегающих процессах обработки слитковых и порошковых металлических сплавов.

Ключевые слова: сварка, карбиды металлов, полукарбиды, концентрация углерода, оптимальная температуры сварки, энергия активации самодиффузии.

Зависимость эффективной энергии от полученной прочности соединения позволяет описывать процессы, происходящие в операции спекания-сварки, с учетом формирования плотности и микроструктуры заготовок. Эта зависимость состоит из некоторых этапов и соответствует энергии активирования движения вакансий, вакансионных комплексов значениям энергии активирования движения вакансий и других сложных кристаллических несовершенств, а третий этап – энергии активирования самодиффузии на границах частиц.

Сварка в твердой фазе является перспективным методом соединения порошковых материалов, все шире применяемых в различных направлениях техники. Процесс образования соединения при сварке в твердой фазе протекает в три стадии: 1) образование физического контакта (путем пластической деформации и поверхностной диффузии); 2) электронный обмен, направленный на образование энергетически более устойчивых электронных конфигураций и завершающийся образованием химических связей (адгезионное взаимодействие); 3) диффузионное взаимодействие, распространяющееся в объеме материала. В зависимости от природы свариваемых материалов лимитирующей оказывается одна из вышеуказанных стадий.

В случае сварки одноименных металлов, а также металлов с близкими характеристиками сопротивляемости пластической деформации продолжительность образования соединения совпадает с первой стадией [1]. В работе [2] установлена корреляция адгезионных свойств металлов с их механическими свойствами.

При сварке металлических материалов, из которых один весьма пластичен и легко образует физический контакт с другим, образование соединения в значительной мере определяется возникновением активных центров (дислокаций, вакансий) на поверхности менее пластичного материала [3]. Взаимодействие при сварке начинается прежде всего на структурных дефектах контактной поверхности и обуславливается пластической деформацией поверхностного слоя менее пластичного металла [4].

При сварке порошковых пористых материалов вклад процесса пластической деформации в механизм образования сварного соединения не может быть таким значительным, как при сварке компактных металлов и сплавов [3]. Физический контакт образуется преимущественно за счет поверхностной диффузии. Здесь развитие третьей стадии необходимо для обеспечения требуемой прочности соединения, однако чрезмерное увеличение длительности этой стадии нежелательно, так как может привести к понижению прочности свариваемых материалов. Последнее наблюдается в тех случаях, если процессы рекристаллизации затрагивают не только зону сварки, где они необходимы, но и сам материал, а при сварке разнородных материалов, если в зоне сварки образуются новые химические соединения, обладающие повышенной хрупкостью.

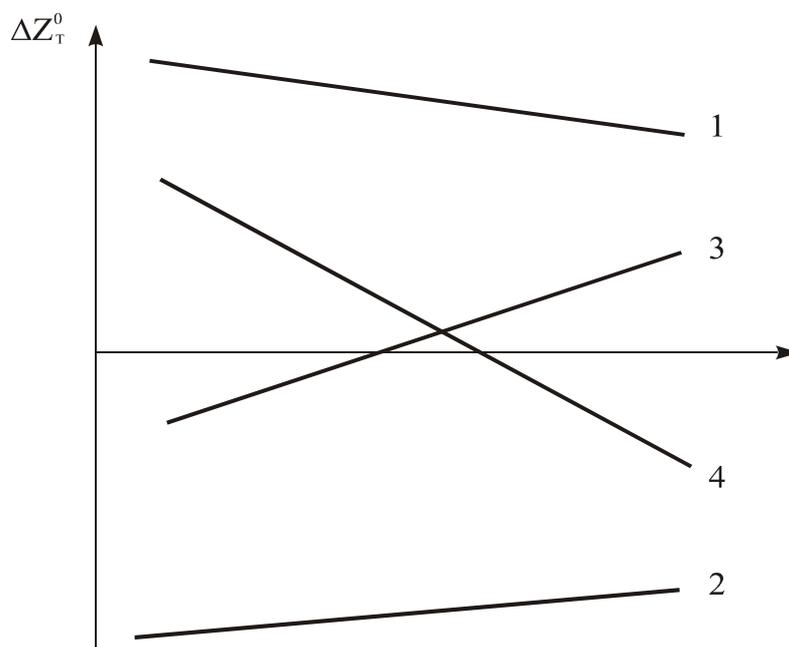
Направление и возможность прохождения предполагаемых реакций при сварке могут быть выяснены на основе термодинамических оценок величины изменения изобарно-изотермического потенциала ΔZ_T^0 .

При этом возможны четыре основных случая (рис.1). Изменение ΔZ_T^0 во всем температурном интервале лежит в области положительных значений; здесь нельзя получить прочного сварного соединения за счет образования химической связи (1). Изменение ΔZ_T^0 лежит в области отрицательных значений и слабо зависит от температуры (2); в этом случае чрезмерное развитие процессов реакционной диффузии может привести к изменению свойств материалов в зоне сварного соединения (в том числе снижению прочности и разрушению). ΔZ_T^0 имеет отрицательное значение, однако с повышением температуры возрастает (3); это также нежелательно поскольку здесь будет наблюдаться как низкая прочность сварного шва, так и быстрое разрушение его в условиях высоких температур. ΔZ_T^0 имеет отрицательное значение лишь начиная с некоторой, достаточно высокой

температуры (4); в этом случае при высоких температурах происходит активное химическое взаимодействие, которое при достаточно низкой температуре прекращается.

Осуществляя сварку при температуре, превосходящей температуру начала реакции, можно получить высокую прочность сварного соединения за счет химического взаимодействия, в то время как при более низких температурах нет опасности его чрезмерного развития.

При термодинамической оценке возможности сварки порошковых материалов с широкой областью гомогенности, в том числе карбидов, необходимо учитывать изменение термодинамических характеристик (энтальпии, энтропии, свободной энергии образования) в пределах областей гомогенности. Термодинамический расчет, выполненный с учетом данного обстоятельства [5], в частности, показал следующее: несмотря на то, что обменные реакции монокарбидов переходных металлов IV группы с металлами V и VI групп с образованием новых монокарбидных фаз в интервале температур 1000-2000 °С термодинамически невозможны, термодинамически разрешенными являются реакции с переходом первого карбида в дефектное состояние и образованием стехиометрического карбида второго металла или двух нестехиометрических карбидов.



**Рис. 1. Типичные температурные зависимости изобарно-изотермического потенциала твердофазных реакций (схема).
Обозначения см. в тексте**

Экспериментальными исследованиями установлено [18], что при диффузионной сварке (то есть при прочной сварке) карбидов металлов типа Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ и Mn_7C_3 с железом III стадия сопровождается появлением

дефектности в углеродной подрешетке карбида и диффузионным насыщением металла углеродом. При сварке с учетом этих карбидов образуются твердый раствор полукарбидов и углерода в железе. Полукарбид, при этом, является химическим раствором или расплавом, который характеризуется значительно большей температурной стойкостью, а также может легко внедряться в твердые растворы с другими металлами. Стоит отметить, что полукарбид имеет чрезвычайно высокую износостойкость, а его химическое состояние описывается кубической решеткой [5]. При этом образование твердого раствора углерода в металле предшествует появлению полукарбида, который обнаруживается лишь при достаточно высоких температурах и выдержках. В системе Cr-C образование низших соединений невозможно, сварка возможно лишь посредством диффузии хрома в цементит. Причем это происходит в результате диффузии хрома в цементит преимущественно по границам зерен и развития процесса рекристаллизации.

При переходе от системы MeC-Me к системам MeC – Me' можно отметить усложнение процесса взаимодействия, поскольку в данном случае образование новых фаз при сварке происходит в результате диффузии как углеродных, так и металлических атомов.

Так, методом микрорентгеноспектрального анализа установлено, что при сварке порошковых материалов типа аустенитно-карбидного сплава наблюдается преимущественная диффузия углерода из карбида в железо и встречная диффузия атомов металлов в карбид металла с образованием твердого раствора на основании исходного карбида. Для сварки карбидов металлов с металлами характерна как диффузия углерода из карбида в металл, так и встречная диффузия металлов с образованием непрерывного ряда твердых растворов MeC – Me'C или тройных фаз. Карбиды металлов свариваются с металлами (в данном случае с железом) за счет обменных реакций, а выделяющиеся в результате атомы металла растворяются в образующемся карбиде. Для этих систем наблюдается тенденция преимущественной диффузии металла в карбид, что наиболее четко отмечено для систем Cr₇C₃-Fe, Cr₂₃C₆-Fe и Mn₇C₃-Fe.

Решение системы уравнений, описывающих кинетику твердофазных реакций в трехкомпонентных системах, в общем случае затруднительно. В частном случае, когда лимитирующей стадией являются диффузионные процессы и кинетическими факторами на границе раздела фаз можно пренебречь, решение в значительной мере упрощается.

Так, например, для случая контактного взаимодействия карбида стехиометрического состава (MeC) с металлом (Me'), в результате которого диффузия углерода приводит к изменению состава исходного карбида в сторону объединения его углеродом (карбид-бесконечный источник углерода). Для определения толщины образующегося карбидного слоя возможно использование следующего выражения [19]:

$$\varepsilon = 2a\sqrt{D_2\tau}, \quad (1)$$

где D_2 – коэффициент диффузии в образующемся карбиде $Me'C$, а коэффициент a определяется из равенства:

$$\frac{C_{01}-C_{11}}{C_{22}} \sqrt{\frac{D_1}{\pi D_2}} \cdot \frac{1}{a} = \exp a^2 + \frac{c_{33}}{ac_{21}} \sqrt{\frac{D_3}{\pi D_2}} \cdot \frac{\exp a^2 \left(1 - \frac{D_2}{D_3}\right)}{\left[1 - \operatorname{erf}\left(a \frac{\sqrt{D_2}}{D_3}\right)\right]}. \quad (2)$$

Здесь индексы 1, 2, 3 относятся соответственно к исходному (MeC), образующемуся ($Me'C$), карбидом и исходному металлу, а концентрация углерода C определяется начальными и граничными условиями (рис.2):

$$C_1(x, 0) = C_{01}, C_1(0, \tau) = C_{11}, x \leq 0,$$

$$C_2(\varepsilon, \tau) = C_{22}, C_3(\varepsilon, \tau) = C_{33}, C_3(\infty, \tau) = 0.$$

На основании литературных данных о параметрах диффузии углерода в карбиды [3], используя методики обработки данных с учетом проверки значимости данных [7, 8] в работе выполнены расчеты и построена изотерма роста толщины карбидного слоя, образующегося на железе при контакте его с карбидом хрома при спекании-сварке ($T=1200^\circ C$).

Экспериментальная проверка показала, что при твердофазном взаимодействии карбида хрома с железом действительно образуется легированный карбид железа Fe_3C , причем значения его толщин при отжиге до 10 ч удовлетворительно укладывается на расчетную кривую (рис.3).

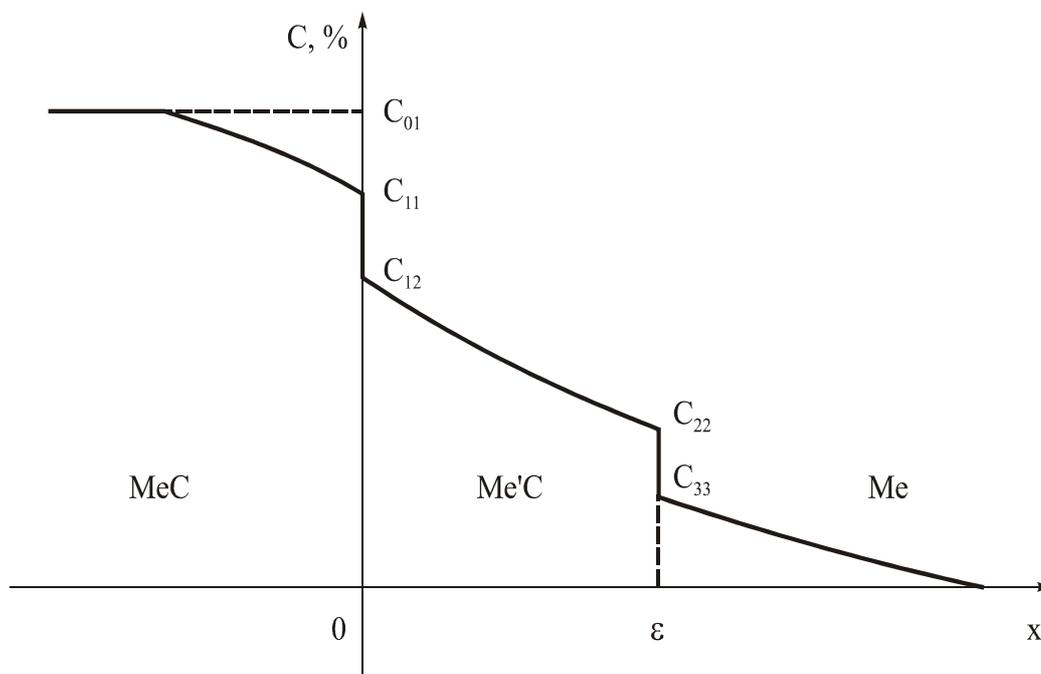


Рис. 2. Распределение концентрации углерода в процессе его реакции из карбида в контактирующий металл к моменту времени τ (схема)

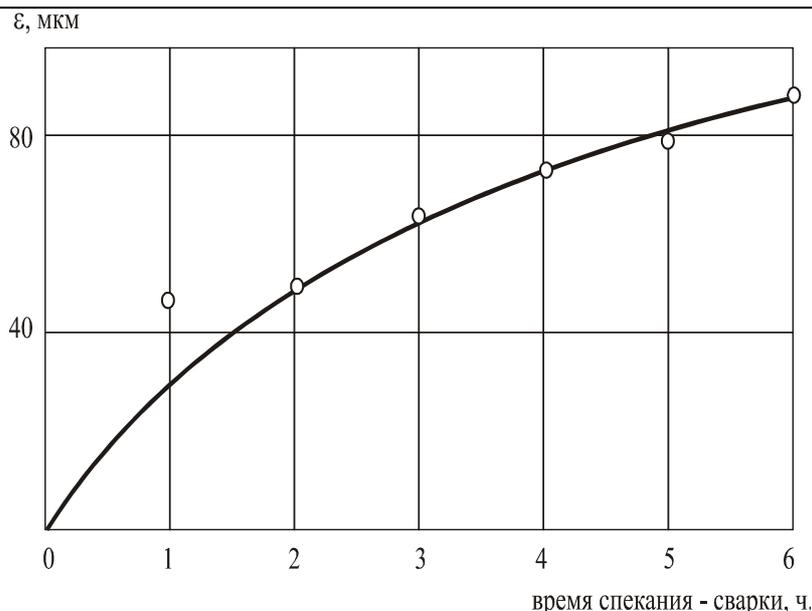


Рис. 3. Вычисленные (линия) и экспериментально найденные значения (точки) толщины слоя карбида железа на железе после контакта его с карбидом хрома

Таким образом, в принципе возможен расчет длительности процесса диффузионной сварки аустенитно-карбидного сплава с железо-медным сплавом, при которой образуется диффузионный слой заданной толщины.

Представляет интерес сопоставить экспериментально определенные оптимальные температуры диффузионной сварки металлов и карбидов с параметрами самодиффузии углерода и металла в этих карбидах.

Оптимальной считается температура, при которой исчезает физическая граница раздела при сварке однородных материалов, причем процессы рекристаллизации затрагивают лишь зону сварки и прочность материалов после сварки не снижается.

Диффузионные процессы, протекающие с приложением внешнего давления, как правило, ускоряются за счет искажений кристаллической решетки и появления большого числа дефектов кристаллического строения различного типа. Однако вследствие большой подвижности атомов при высокотемпературном деформировании искажения быстро релаксируют, что приводит к снятию напряжений. Поэтому эффект увеличения диффузионной подвижности при пластической деформации образцов наблюдается редко.

При изучении материалов [23, 29] установлено, что основной характеристикой состояния металла при высокотемпературном деформировании является не величина деформации, а ее скорость. При рассмотрении процессов диффузии в сварных соединениях, в связи с кратковременностью пребывания приповерхностного слоя в режимах больших скоростей

деформирования (доли секунды по сравнению с длительностью сварки 10 мин) в первом приближении, можно использовать значения энергетических параметров, полученных в стационарных условиях.

Сведения о параметрах самодиффузии углерода и металла в карбидах весьма ограничены. Они представлены в таблице и имеют большой разброс в значениях D_0 (м²/с) и значениях Q (ккал/моль) [4]. Это связано с неодинаковой пористостью и стехиометрией изучаемых объектов, с применением различных методик исследования. Более полные данные имеются по самодиффузии металлов, хотя и здесь нельзя не отметить существенный разброс в величинах D_0 и Q особенно для таких металлов, как Fe и др., для которых характерны $\alpha \leftrightarrow \beta$ полиморфные превращения.

Параметры самодиффузии углерода и металла в карбидах

Карбид	Диффундирующий элемент	Температурный интервал, °С	D_0 , м ² /с	Q , ккал/моль
Me ₇ C ₃	C	1000-1300	350	66
Me ₂₃ C ₆	C	900-1400	56,4	124
Me ₇ C ₃	Fe	800-1200	$4.53 \cdot 10^{-4}$	180,4±40
Me ₂₃ C ₆	Fe	850-1450	$1,43 \cdot 10^4$	150,3

Для осуществления диффузионной сварки карбидов необходимо диффузионное перемещение как углеродных, так и металлических атомов, однако лимитирующим звеном процесса совершенно очевидно будет более медленная стадия, а именно – диффузия металлических атомов. В связи с этим естественно предположить, что энергетическая затрудненность процесса, при прочих равных условиях, должна возрастать с увеличением энергии связи в металлической подрешетке и, следовательно, энергии активации самодиффузии металлических атомов в карбидах.

Таким образом, оптимальные температуры сварки порошковых материалов качественно коррелируют с энергией активации самодиффузии этих металлов и возрастают с повышением степени локализации валентных электронов в кристаллической решетке. Для карбидов наблюдается качественная корреляция оптимальных температур сварки с энергией активации самодиффузии наименее подвижного (металлического) компонента и со степенью локализации валентных электронов в металлической подрешетке.

При сварке карбидов с металлами не удалось установить подобную корреляцию оптимальных температур сварки с диффузионными параметрами. Это связано с тем, что при переходе от систем Me-Me, MeC-MeC к системам MeC – Me' процесс взаимодействия усложняется. Сварка сопровождается образованием новых фаз в результате диффузии углерода и встречной диффузии разноименных металлических атомов.

В заключение можно отметить, что для оценки возможности химического взаимодействия при сварке разноименных материалов можно пользоваться термодинамическим подходом; при этом в случае карбидов с широкой областью гомогенности необходимо учитывать влияние состава в области гомогенности на термодинамические функции.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [9-41].

Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Рабинович В.А., Хавин З.Д. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1980. 391с.
2. Радомысельский И.Д. Порошковые конструкционные детали. Современное состояние, перспективы развития // Порошковая металлургия, 1985. №10. С.37-41.
3. Радомысельский И.Д., Печентковский Е.Л., Сердюк Г.Г. Пресс-формы для порошковой металлургии: Расчет и конструирование. Киев: Техника, 1970. 172 с.
4. Раковский В.С. Спеченные материалы в технике. М.: Металлургия, 1976. 233 с.
5. Роман О.В., Габриелов И.П. Справочник по порошковой металлургии: порошки, материалы, процессы. Беларусь, 1988. 175 с.
6. Гадалов В.Н., Болдырев Ю.В., Скрипкина Е.В. Изучение изотермического выдавливания порошкового титанового сплава методом математического планирования эксперимента // Известия Курского государственного технического университета. 2004. № 2 С.25-27.
7. Евдокимова А.О., Калужских А.П., Скрипкина Е.В. Анализ эколого-экономической обстановки Курской области методами корреляционного анализа // Сборник научных статей НПК студентов и аспирантов с международным участием: Математика и ее приложения в современной науке и практике. 2014. С.227-231.
8. Бурилич И.Н., Журавлева Е.В., Скрипкина Е.В. Задача проверки однородности двух независимых выборок // Известия Курского государственного технического университета. 2016. № 1(18). С. 62-65.
9. Gvozdev A.E. Effect of the stress state on superplasticity of hard-to-deform high-speed powder steel // Металлы. 1994. № 4. Р. 127-131.
10. Расчет кластерной структуры расплава, ее влияние на образование наноаморфных твердых фаз и их структурную релаксацию при последующем нагреве / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, А.В. Афанаскин, Е.А. Гвоздев // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 6. С. 12-16.

11. Влияние разнотерности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // *Материаловедение*. 2014. № 7. С. 23-26.

12. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels / А.Е. Gvozdev, I.V. Minaev, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 1. Р. 41-44.

13. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation // А.Е. Gvozdev, D.N. Bogolyubova, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 1. Р. 32-40.

14. Role of nucleation in the of first-order phase transformations / А.Е. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 4. Р. 283-288.

15. Комплексные задачи теории пластичности: монография / Н.Д. Тутьшкин, А.Е. Гвоздев, В.И. Трегубов, Ю.В. Полтавец, Е.М. Селедкин, А.С. Пустовгар, В.И. Золотухин, Г.М. Журавлев, В.И. Золотухин; 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 408 с.

16. Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев // *Технология металлов*. 2016. № 1. С. 23-32.

17. Синтез и триботехнические свойства композиционного покрытия с матрицей из полиимида (Р-ООО) ФТ и наполнителем из наночастиц дисульфида вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков, Ю.А. Фадин // *Материаловедение*. 2016. № 4. С. 44-48.

18. Ресурсы деформационной способности различных материалов: учебное пособие / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, А.А. Калинин, С.Е. Александров, Н.Е. Стариков, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, С.Н. Кутепов, Е.В. Цой, Д.С. Клементьев, Е.Б. Соломатникова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 172 с.

19. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.

20. О состоянии превращения металлов и сплавов: монография / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 245 с.

21. Особенности структурных и фазовых превращений в титановых заготовках в процессе высокоскоростного пластического деформирования: монография / Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, А.Д. Бреки, В.В. Медведева, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий.; под ред. Н.А. Крылова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 202 с.

22. Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния, для узлов трения управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 166 с.

23. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

24. Сопряженные поля в упругих, пластических, сыпучих средах и металлических труднодеформируемых системах: монография / Э.С. Макаров, В.Э. Ульченкова, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 526 с.

25. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 32-47.

26. Анализ теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания металлов и сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 3(72). С. 6-33.

27. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

28. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92.

29. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95.

30. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

31. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // *Сталь*. 2017. № 6. С. 26-39.

32. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

33. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 32-36.

34. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 56-59.

35. Maximum plastic strengthening in tool steels / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, A.E. Cheglov, N.N. Sergeev, O.M. Gubanov // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. № 6. P 399-411.

36. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // *Материаловедение*. 2017. № 7. С. 11-22.

37. Новые конструкционные материалы: учебное пособие / Н.Е. Стариков, В.К. Зеленко, О.В. Кузовлева, А.Н. Сергеев, В.Ю. Кузовлев, А.А. Калинин, А.В. Маляров; под. общ. ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 296 с.: ISBN 978-5-7679-3845-2.

38. *Материаловедение: учебник для вузов* / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев., В.К. Зеленко, А.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е доп. и испр. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 469 с.: ISBN 978-5-7679-3776-9.

39. *Технология металлов и сплавов: учебник* / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, О.В. Кузовлева, Г.М. Журавлёв, Д.А. Провоторов.; Под ред. проф. Н.Н. Сергеева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 490 с.

40. Патент на полезную модель 2016122692/28 (166249) Образец для определения когезионной прочности газотермических порошковых покрытий / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе,

И.В. Тихонова, А.Д. Бреки, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, А.А. Калинин, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, М.В. Ушаков; заявитель и патентообладатель Гвоздев Александр Евгеньевич. № 2016122692/28 заявл. 08.06.16; опубл. 20.11.16, Бюл. № 32.

41. Патент на полезную модель 2016142134 (170385) Образец для определения адгезионной прочности покрытий / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, И.В. Тихонова, А.Д. Бреки, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, А.А. Калинин, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.И. Кузнецова, А.В. Казакова, Д.Н. Романенко, Е.Ф. Романенко, В.Э. Лисицина; заявитель и патентообладатель Гвоздев Александр Евгеньевич. № 2016142134 (17385) заявл. 26.10.16; опубл. 24.04.17. Бюл. № 12. 6 с.

Гадалов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, gadalov-vn@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Скрипкина Елена Васильевна, канд. техн. наук, доцент, lenagrants35@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Беседин Александр Геннадьевич, канд. физ.-мат. наук, tef46@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Гвоздев Александр Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, gwozdew.alexandr2013@yandex.ru Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Кутепов Сергей Николаевич, канд. пед. наук, доцент, kutepov.sergei@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Пантюхин Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, olegpantuyukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DIFFUSION PROCESSES AND THEIR PHYSICAL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION AT WELDING OF POWDER MATERIALS

V.N. Gadalov, E.V. Skripkina, A.G. Besedin, A.E. Gvozdev, S.N. Kutepov, O.V. Pantuyukhin

Various physical and mechanical processes that occur during the formation of permanent joints in the welding in the solid phase of various metal heterophase materials obtained by powder metallurgy are analyzed. The phenomena of surface, boundary and bulk diffusion in iron alloys with carbide hardening are considered. Parameters of self-diffusion of carbon and iron in alloys-chemical compounds of various stoichiometric composition-are presented. An analytical expression involving the diffusion parameters of alloying components and the values of their concentration in metallic systems is used, which is used to establish the laws governing the development of the formation of compounds in solid-state welding. The results can be used in resource-saving processing processes for ingot and powder metal alloys.

Key words: welding, metal carbides, semicarbides, carbon concentration, optimal welding temperatures, activation energy of self-diffusion.

Gadalov Vladimir Nikolaevich, doctor of technical science, professor, gadalov-vn@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Skripkina Elena Vasil'yevna, candidate of technical science, docent, lenagrant35@mail.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Besedin Aleksandr Gennad'yevich, candidate of physico-mathematical sciences, docent, tef46@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Gvozdev Aleksandr Evgen'yevich, doctor of technical science, professor, gvozdev.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Kutepov Sergey Nikolaevich, candidate of pedagogical science, docent, kutepov.sergei@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Pantjuhin Oleg Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, olegpantyukhin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.96

ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН С ДИСКРЕТНЫМ ИСПОЛНЕНИЕМ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ

С.Я. Хлудов, М.О. Борискина, А.С. Хлудов, А.О. Чечуга

Исследования проводились в производственных и лабораторных условиях с использованием промышленного оборудования и современных измерительных средств. Установлена закономерность влияния дискретной режущей кромки на температуру резания, стойкость режущей пластины и силу резания при черновом точении материалов групп Р и М.

Ключевые слова: режущая пластина, стружкообразование, износ, задняя поверхность, составляющие силы резания, скорость резания.

В качестве объекта исследования были приняты экспериментальные многоступенчатые режущие пластины с дискретным исполнением режущей кромки.

Экспериментальные пластины изготавливались на инструментальном производстве ООО «Щекинский завод РТО». Формирование формы дискретной режущей кромки осуществлялось на режущей пластине электроэрозионным методом с использованием адаптивной системы выбора режима обработки станка «Sodick» мод. AQ 535L в соответствии с материалом обрабатываемого изделия.

При проведении экспериментов использовались режущие пластины трех исполнений. В первом случае многоступенчатая режущая пластина SNMG 190616 (рис. 1) имела плоскую переднюю поверхность на трех ступенях, которые выполнены с равными радиусами при вершине

$$R_1 = R_2 = R_3 = 1,6\text{мм}$$

и с равными радиусами r_{ni} переходных участков режущей кромки

$$r_{n1} = r_{n2} = r_{n3} = 0,1\text{мм} .$$



Рис. 1 Экспериментальная многоступенчатая режущая пластина SNMG 190616 с дискретным исполнением режущей кромки на трех ступенях

Количество ступеней режущей пластины выбиралось с учетом значения глубины резания $t = 6$ мм. Каждая из ступеней срезала припуск с $t_i=2$ мм.

Во втором случае, многовершинная режущая пластина SNMG 190616 (рис. 2) имела плоскую переднюю поверхность на трех ступенях, которые выполнены с радиусами при вершине

$$R_1 = 2,4\text{мм}; R_2 = R_3 = 0,8\text{мм}$$

и с равными радиусами r_{ni} переходных участков режущей кромки

$$r_{n1} = r_{n2} = r_{n3} = 0,2\text{мм} .$$



Рис. 2. Экспериментальная многоступенчатая режущая пластина SNMG 190616 с исполнением режущей кромки на первой ступени по лекальной кривой

На первой ступени активная часть режущей кромки формировалась по лекальной кривой. Количество ступеней режущей пластины выбиралось с учетом значения глубины резания $t = 3,5$ мм. Первая ступень срезала припуск глубиной резания $t_1=0,5$ мм, а вторая и третья ступени, соответственно, $t_2=t_3=1,5$ мм. Оценка результатов экспериментальных исследований многоступенчатой режущей пластины осуществлялось в сравнении с результатами полученными при точении режущей пластиной SNMG 190616 стандартного исполнения с плоской передней поверхностью (рис. 3).



Рис. 3. Режущая пластина SNMG 190616 стандартного исполнения с плоской передней поверхностью

В третьем случае многоступенчатая режущая пластина SNMG 190608 (рис. 4) имела плоскую переднюю поверхность на двух ступенях, которые выполнены с радиусами при вершине ступени

$$R_1 = 1,2\text{мм} ; R_2 = 0,8\text{мм} ,$$

и с равными радиусами r_{ni} переходных участков режущей кромки

$$r_{n1} = r_{n2} = r_{n3} = 0,15\text{мм} ,$$

и переднюю поверхность с индексом ММ на ступенях с радиусами при вершине

$$R_1 = 1,2\text{мм} ; R_2 = 0,8\text{мм} .$$



Рис. 4. Экспериментальная многоступенчатая режущая пластина SNMG 190608 (-ММ) с двумя ступенями с плоской передней поверхностью и с передней поверхностью с индексом ММ

Количество ступеней режущей пластины выбиралось с учетом значения глубины резания $t = 3,0$ мм. Первая ступень и вторая ступени, соответственно, $t_1=t_2=1,5$ мм.

В качестве обрабатываемых материалов использовались стали групп P и M по классификации ISO: 10; 45; 45X1; 30XГСА; 08X18H10T; ЭИ 652.

Стойкостные эксперименты проводились на токарном станке 16К20. Резец устанавливался по линии центров. Положение вершины резца относительно линии центров фиксировалось с помощью рейсмуса или с использованием концевых мер длины. Износ пластины контролировался по задней поверхности с помощью инструментального микроскопа МИР-1.

Температура резания определялась методом естественно образующейся термопары [10]. Для исключения влияния «паразитных» термопар отсчет значений осуществлялся в момент стабилизации показаний милливольтметра через $3 \div 4$ с после начала обработки.

Составляющие силы резания измерялись при помощи динамометра УДМ-600. В начале каждого эксперимента проводилась тарировка динамометра. Полученные сигналы передавались на усилитель, а с него на компьютер, оснащенный специальной измерительной платой La-2M.

Для преобразования сигналов использовалась программа «ADCLab». Эта программа позволяет увидеть сигнал, измеряемый с помощью устройства АЦП, в реальном времени, а также его спектр. Результаты измерения сохранялись в виде файлов с расширением dat. Используя программу «ADCLab» и данные тарировки устанавливались результаты измерения силы резания.

Разделение припуска на части, предопределяет разделение тепловых потоков. Каждая ступень работает в условиях меньших тепловых нагрузок и, соответственно, в более благоприятных условиях по сравнению с работой режущей пластины стандартного исполнения.

Экспериментальная многоступенчатая режущая пластина SNMG 190616 с дискретным исполнением режущей кромки на трех ступенях при точении с подачей $s=0,39$ мм/об и глубиной резания $t=6$ мм, что соответствует режимам чернового точения, имела длину активной части режущей кромки $L_a = 8,13$ мм. Длина активной части режущей кромки режущей пластины SNMG 190616 стандартного исполнения при тех же условиях работы была $5,36$ мм (рис. 5).

Таким образом, при равных условиях обработки экспериментальная многоступенчатая режущая пластина SNMG 190616 с дискретным исполнением режущей кромки на трех ступенях имела на 36% большую длину ее активной части по сравнению с режущей пластиной SNMG 190616

стандартного исполнения. Увеличение активной части режущей кромки, как отмечают многие исследователи, обеспечивает более интенсивный отвод образующегося при точении тепла, что снижает среднюю температуру резания [10, 27, 34].

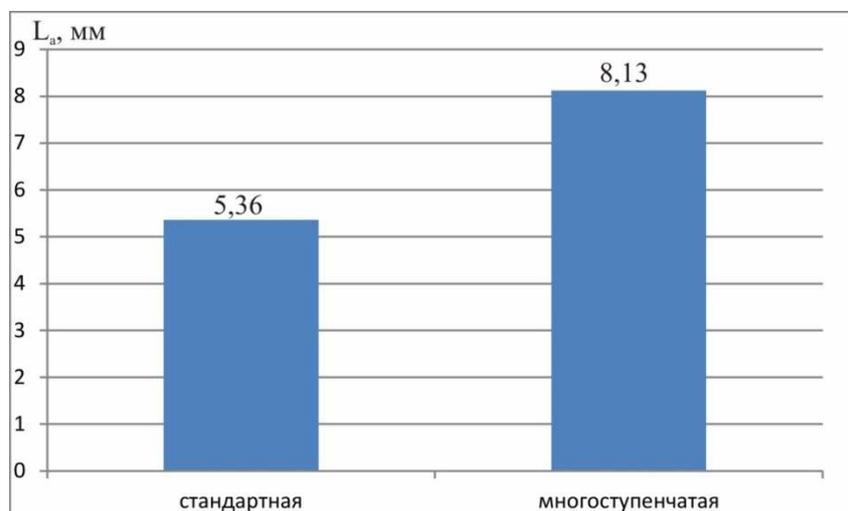


Рис. 5. Длина L_a активной части режущей кромки режущих пластин с многоступенчатым и стандартным исполнением при $s=0,39$ мм/об и $t=6$ мм

При точении стали 45X1 экспериментальной многоступенчатой режущей пластины SNMG 190616 с дискретным исполнением режущей кромки на трех ступенях со скоростью резания $V=196$ м/мин, подачей $s=0,39$ мм/об и глубиной резания $t=6$ мм при измерении методом естественно образующейся термопары были получены показания милливольтметра 7,1 мВ. При работе режущей пластиной стандартного исполнения с плоской передней поверхностью показания равнялись 9,4 мВ (рис. 6). Из рис. 6 видно, что при точении экспериментальной многоступенчатой режущей пластины SNMG 190616 с дискретным исполнением режущей кромки на трех ступенях разделение тепловых потоков и увеличение активной части режущей кромки обеспечивает уменьшение средней температуры резания по сравнению с режущей пластиной стандартного исполнения на 20...25%.

В процессе работы экспериментальной многоступенчатой режущей пластины SNMG 190616 с исполнением режущей кромки на первой ступени по лекальной кривой при точении с подачей $s=0,43$ мм/об и глубиной резания $t=3,5$ мм, что соответствует режимам чернового точения, имела длину активной части режущей кромки $L_a = 4,43$ мм. Длина активной части режущей кромки режущей пластины SNMG 190616 стандартного исполнения при тех же условиях работы была 3,16 мм. При равных условиях обработки экспериментальная многоступенчатая режущая пластина SNMG

190616 с исполнением режущей кромки на первой ступени по лекальной кривой имела на 28% большую длину ее активной части по сравнению с режущей пластиной SNMG 190616 стандартного исполнения.

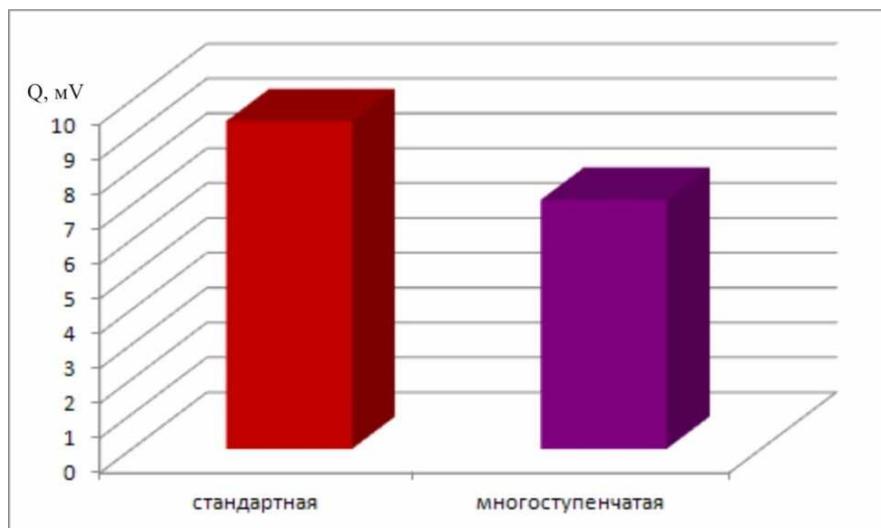


Рис. 6. Влияние дискретного исполнения режущей кромки на термо-ЭДС

При точении стали 30ХГСА экспериментальной многоступенчатой режущей пластины SNMG 190616 с исполнением режущей кромки на первой ступени по лекальной кривой со скоростью резания $V=174$ м/мин, подачей $s=0,43$ мм/об и глубиной резания $t=3,5$ мм при измерении методом естественно образующейся термопары были получены показания милливольтметра 6,4 мВ. При работе режущей пластиной стандартного исполнения с плоской передней поверхностью показания равнялись 8,1 мВ. Из приведенных результатов видно, что при точении экспериментальной многоступенчатой режущей пластины SNMG 190616 с исполнением режущей кромки на первой ступени по лекальной кривой разделение тепловых потоков и увеличение активной части режущей кромки обеспечивает уменьшение средней температуры резания по сравнению с режущей пластиной стандартного исполнения на 23%.

Анализ результатов полученных при точении многоступенчатой режущей пластиной показал, что разделение припуска на части обеспечивает снижение температуры резания по сравнению со стандартной режущей пластиной на 20 – 25%, что объясняется увеличением длины активной части режущей кромки и разделения тепловых потоков по ступеням.

При сохранении постоянной площади поперечного сечения среза силы резания уменьшаются по мере уменьшения ширины и одновременно увеличения толщины [10, 27, 34]. При использовании многоступенчатых режущих пластин разделение припуска на части приводит к уменьшению силы резания. Тангенсальная составляющая силы резания P_z при точении

стали 45 и 08X18H10T со скоростью $V=126$ м/мин, подачей $s=0,26$ мм/об и глубиной резания $t=3$ мм режущей пластиной SNMG 190608 (-ММ) с двумя ступенями с плоской передней поверхностью и с передней поверхностью с индексом ММ, соответственно на 5% и 18% была меньше, чем при работе режущей пластиной режущей пластиной SNMG 190608-ММ.

Измерение составляющих силу резания показало, что дискретная режущая кромка оказывает влияние на соотношение радиальной и осевой составляющих силы резания. Уменьшение радиальной P_y составляющей силы резания при использовании режущей пластиной SNMG 190608 (-ММ) с двумя ступенями с плоской передней поверхностью и с передней поверхностью с индексом ММ по отношению к результатам, полученным при точении СМП стандартного исполнения, составило 15...20%, что позволяет предполагать о возможности повышения виброустойчивости.

Стойкость многоступенчатой режущей пластины контролировалась по величине δ износа задней поверхности на каждой из ступеней. По полученным результатам построены графики изменения износа по задней поверхности в зависимости от времени работы резца (рис. 7).

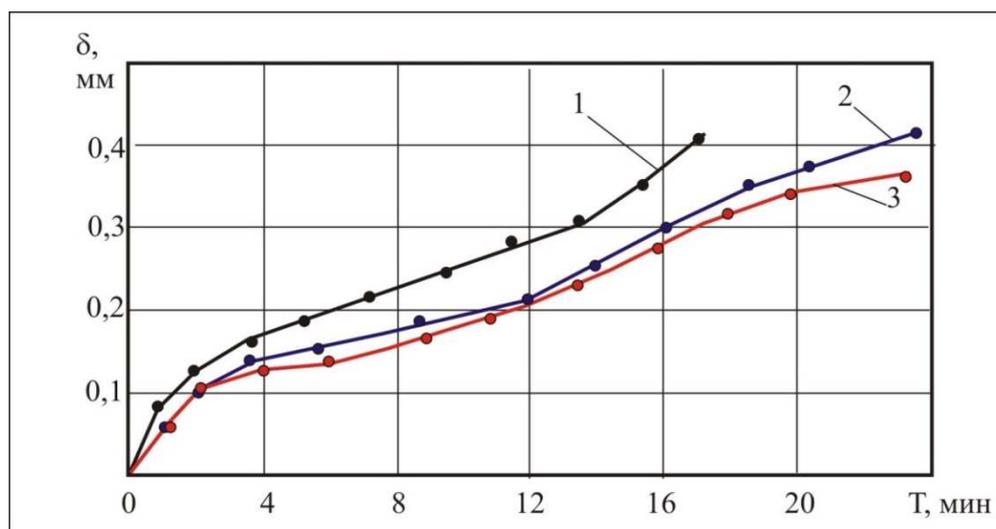


Рис. 7. Изменение ширины фаски износа задней поверхности при точении стали 08X18H10T при скорости резания $v = 126$ м/мин, $s=0,26$ мм/об и $t=3$ мм режущими пластинами: 1 – стандартного исполнения; 2 - на второй ступени SNMG 190608 с двумя ступенями; 3 – на первой ступени SNMG 190608 с двумя ступенями

Из графиков видно, что разделение тепловых потоков и уменьшение глубины резания, обеспечило повышение стойкости на второй ступени в 1,75 раза по сравнению со СМП стандартного исполнения. При точении пластиной с двумя ступенями нарастание износа задней поверхности на первой ступени происходит равномерно вдоль всей активной части режущей кромки.

Результаты измерения шероховатости обработанной поверхности при точении экспериментальной многоступенчатой режущей пластины SNMG 190616 с исполнением режущей кромки на первой ступени по лекальной кривой и режущей пластиной стандартного исполнения режущей кромки приведены на рис. 8.

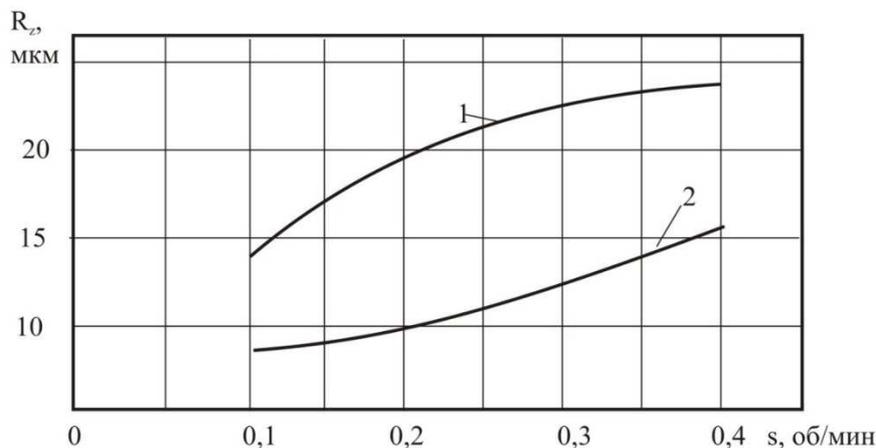


Рис. 8. Влияние подачи на шероховатости обработанной поверхности при точении стали 30ХГСА со скоростью резания $v = 154$ м/мин и глубине резания $t = 3$ мм резцом, оснащенным СМП: 1 – SNMG 190616; 2 – SNMG 190616 с исполнением режущей кромки на первой ступени по лекальной кривой

При точении СМП – SNMG 190616 стандартного исполнения шероховатость обработанной поверхности заготовки из стали 30ХГСА была выше шероховатости, полученной при точении СМП с двумя ступенями, на всем диапазоне изменения подачи.

Список литературы

1. Борискин О.И., Зябрев С.В., Хлудов С.Я. Исследование работоспособности режущих пластин с дискретным исполнением режущей кромки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 130-135.
2. Хайкевич Ю.А., Хлудов С.Я., Хлудов В.С. Исследование влияния формы режущей кромки у вершины СМП на процесс чистового точения // Известия Тульского государственного университета. Технология машиностроения, 2006. Вып. 5. С. 156 – 159.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов [Текст] / В.Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1975. 344с.
4. Борискин О.И., Зябрев С.В., Нуждин А.В., Хлудов С.Я. Многофункциональные сменные многогранные пластины //Сборник тезисов и аннотаций XV МНТК «Фундаментальные проблемы техники и технологии – 2012» Москва-Орел.: Изд-во «Спектр». С.246-248.

Хлудов Сергей Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Борискина Маргарита Олеговна, аспирант, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Хлудов Алексей Сергеевич, аспирант, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чечуга Антон Олегович, студент, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STUDIES TO CAPACITY TO WORK MNOGOSTUPENCHATYH CUTTING PLATES WITH DISCRETE PERFORMANCE OF THE CUTTING EDGE

S.Y. Khludov, M.O. Boriskina, A.S. Khludov, A.O. Chechuga

The Studies were conducted in production and laboratory condition with use the industrial equipment and modern measuring facilities. The Installed regularity of the influence of the discrete cutting edge on the temperature of the cutting, stability of the cutting plate and power of the cutting at черновом sharpening material of the groups P and M.

Key words: cutting plate, shaving, wear-out, back surface, forming power of the cutting, velocity of the cutting.

Khludov Sergei Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Boriskina Margarita Olegovna, postgraduate, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Khludov Aleksey Sergeevich, postgraduate, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chechuga Anton Olegovich, student, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.315

**ОЦЕНКА ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С НЕЛИНЕЙНОЙ
И НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ**

А.А. Белицкий, Я.Э. Шклярский

Рассмотрены различные методики оценки добавочных потерь в кабеле в условиях либо нелинейной, либо несимметричной нагрузки. Предложена методика расчета добавочных потерь при работе как нелинейной, так и несимметричной нагрузок. Описан лабораторный эксперимент, подтверждающий эффективность разработанной методики.

Ключевые слова: высшие гармоники, несимметрия, потери, мощность, потери мощности, кабель, нулевой рабочий проводник.

Существует множество методик расчета потерь активной мощности в электрических сетях, связанных с несинусоидальностью и несимметрией фазных токов.

Однако все они позволяют рассчитать потери активной мощности только в электрической сети с линейной несимметричной либо с нелинейной симметричной нагрузкой.

Рассмотрим некоторые из них.

В методике, представленной в [1], предлагается оценить потери мощности по выражению:

$$\Delta P_{\Sigma V} = 3 \sum_{V=2}^n I_V^2 R_l k_{iv}, \quad (1)$$

где v – номер гармоники; I_V – ток v -той гармонической составляющей; R_l – длина участка сети; $k_{iv} = 0.47\sqrt{v}$ – коэффициент изменения активного сопротивления токоведущих частей на v -той гармонике.

Из выражения (1) следует, что она применима только к симметричным сетям с нелинейной нагрузкой для кабелей всех возможных сечений, причем потери при этом в нулевом рабочем проводнике не учитываются.

В основе методики, представленной в [2], лежит выражение (2).

$$\Delta P_{\Sigma V} = 3r_0 l \sum_{V=2}^n I_V^2 (k_{ПV} + k_{\delta V}), \quad (2)$$

где $k_{ПV} = 0,021\sqrt{f}$ - коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта; $k_{\delta V} = \frac{1,18 + k_{ПV}}{0,27 + k_{ПV}} \left(\frac{d}{a}\right)^2$ - коэффициент, учитывающий эффект близости проводников в линии электропередачи; r_0 - удельное сопротивление проводника постоянному току (с учетом температуры), Ом/м; l - длина участка цепи, м; f - частота v -той гармоники, Гц; d - диаметр жилы проводника, мм; a - расстояние между центрами жил, мм.

Выражение (2) как и (1) предназначены для расчета симметричных нелинейных цепей. Однако в них, кроме гармоник, также учитывается сечение проводника, а также расположение токоведущих жил друг относительно друга.

Проанализируем методику расчета дополнительных потерь мощности в несимметричных сетях 0.4 кВ с нулевым рабочим проводником, приведенную в [3], основой которой является выражение (3).

$$\Delta P_i = k_{ui} I_{\varepsilon i}^2 r_{\varepsilon i} k_{Ди}, \quad (3)$$

где k_{ui} - коэффициент, учитывающий количество фаз схемы на участке сети; $I_{\varepsilon i}$ - эффективный ток на участке сети (действующее значение тока); $r_{\varepsilon i}$ - активное сопротивление участка сети; $k_{Ди}$ - коэффициент, учитывающий дополнительные потери от неравномерности нагрузки фаз;

$$k_{Ди} = N^2 \left(1 + 1.5 \frac{r_{HT}}{r_{\Phi}}\right) - 1.5 \frac{r_{HT}}{r_{\Phi}}, \quad (4)$$

где r_{HT}, r_{Φ} - сопротивления нулевого рабочего и фазного проводника;

$N^2 = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_C + I_B)}$ - коэффициент неравномерности.

Выражение (3) позволяет рассчитать добавочные потери в нулевом рабочем проводнике. Однако определяются они только действующим значением тока нулевого рабочего проводника и не учитывают возможное изменение сопротивления нулевого рабочего проводника от частоты гармонических токов.

В работе предложена новая методика расчета, учитывающая влияние как несимметрии, так и несинусоидальности на потери активной мощности в низковольтных трехфазных сетях с нулевым рабочим проводником, а именно:

1. Потери в фазах

$$\Delta P_A = r_{0\phi} l_A \sum_{V=2}^n I_{VA}^2 (k_{ПV} + k_{\delta V\phi}) - \text{потери активной мощности в фа-}$$

зе А. Здесь $k_{ПV} = 0,021\sqrt{f}$ - коэффициент, учитывающий влияние поверх-
ностного эффекта; $k_{\delta V\phi} = \frac{1,18 + k_{ПV}}{0,27 + k_{ПV}} \left(\frac{d_\phi}{a}\right)^2$ - коэффициент, учитывающий
эффект близости фазных проводников в линии электропередачи; $r_{0\phi}$ -
удельное сопротивление фазного проводника постоянному току (с учетом
температуры), Ом/м; l_A - длина участка цепи фазы А, м; f - частота v -той
гармоники, Гц; d_ϕ - диаметр жилы фазного проводника, мм; a - среднее
расстояние между центрами жил, мм; I_{VA} - ток v -той гармоники фазы А.

Для определения среднего расстояния между центрами жил в четы-
рехжильном кабеле на рис. 1 приведены возможные расстояния между
центрами жил [4].

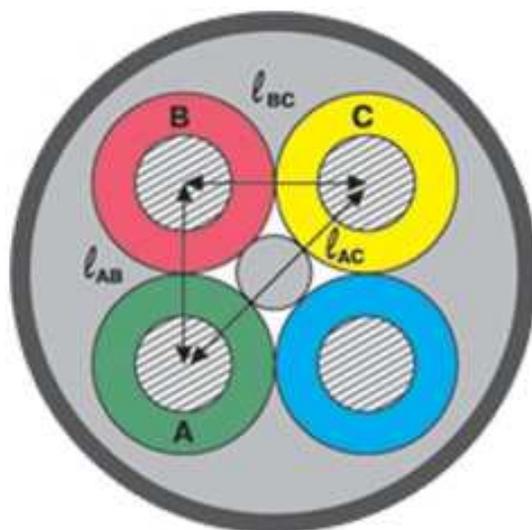


Рис. 1. Схема четырехжильного кабеля

Тогда

$$a = \sqrt[6]{l_{AB}l_{BC}l_{AC}l_{A0}l_{B0}l_{C0}},$$

где $l_{AB}, l_{BC}, l_{AC}, l_{A0}, l_{B0}, l_{C0}$ - расстояние между соответствующими жи-
лами кабеля.

$$\Delta P_B = r_{0\phi} l_B \sum_{V=2}^n I_{VB}^2 (k_{ПV} + k_{\delta V\phi}) - \text{потери активной мощности в фа-}$$

зе В. Здесь l_B - длина участка цепи фазы В, м; I_{VB} - ток v -той гармоники
фазы В.

$$\Delta P_C = r_{of} l_C \sum_{V=2}^n I_{VC}^2 (k_{ПV} + k_{бVф}) - \text{потери активной мощности в}$$

фазе С. Здесь l_C – длина участка цепи фазы С, м; I_{VC} – ток v -той гармоники фазы С.

2. Потери в нулевом рабочем проводнике

$$\Delta P_0 = r_{он} l_0 \sum_{V=2}^n I_{V0}^2 (k_{ПV} + k_{бV0}) - \text{потери активной мощности в ну-}$$

левом рабочем проводнике. Здесь $k_{бV0} = \frac{1,18 + k_{ПV}}{0,27 + k_{ПV}} \left(\frac{d_0}{a}\right)^2$ – коэффициент,

учитывающий эффект близости фазных проводников в линии электропередачи; $r_{он}$ – удельное сопротивление нулевого рабочего проводника постоянному току (с учетом температуры), Ом/м; l_0 – длина участка цепи нулевого рабочего проводника, м; d_0 – диаметр жилы нулевого рабочего проводника, мм; I_{V0} – ток v -той гармоники нулевого рабочего проводника.

Тогда суммарные потери активной мощности в трехфазной сети с нелинейной и несимметричной нагрузкой можно найти по выражению:

$$\Delta P_{\Sigma V} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + \Delta P_0. \quad (5)$$

Для подтверждения адекватности предложенной методики расчета был проведен лабораторный эксперимент, целью которого было подтверждение предположения о том, что добавочные потери в кабеле увеличиваются при нарастании степени как несимметрии, так и несинусоидальности нагрузки.

Эксперимент был направлен на определение добавочных коэффициентов при изменении частоты токов, протекающих в кабеле, а также на определение потерь в нулевом рабочем проводнике не только от токов основной гармоники, но и от токов высших гармоник, протекающих в нем из-за несимметричной и нелинейной нагрузки.

Экспериментальная установка включала в себя четырехжильный кабель, трехфазный программируемый источник переменного тока и напряжения «Энергоформа 3.3», а также однофазный анализатор качества электроэнергии Fluke 43.

К источнику были подключены жилы четырехпроводного кабеля сечением 4 мм², вторые концы жил были соединены в звезду. Общая протяженность кабеля составляла 28.5 м, что является реально возможным участком питающего кабеля от распределительного щита до нагрузки.

Ни рис.2 изображен пример осциллограммы тока, подаваемого на кабель.

С помощью анализатора качества электроэнергии снималось падение напряжения на каждой из жил кабеля, действующие значения тока через жилу.



Рис. 2. На выходы источника подается ток синусоидальной формы:
а - основной гармоники; б - 3-й гармоники

По полученным с помощью анализатора качества электроэнергии значениям тока и напряжения вычислялось значение активного сопротивления участка кабеля и определялись поправочные коэффициенты (таблица). Стоит отметить, что коэффициент мощности, согласно анализатору качества электроэнергии Fluke 43, лежал в пределах от 0.977 до 0.991, что позволяет считать нагрузку полностью активной и пренебречь индуктивной составляющей.

Экспериментальные данные

Номер гар- моники	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, В	0,620	0,637	0,550	0,589	0,583	0,592	0,594	0,595	0,512	0,586
I, А	4,800	5,000	4,230	4,600	4,530	4,560	4,550	4,470	3,790	4,360
Rтеор, Ом	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
Rэсп, Ом	0,129	0,127	0,130	0,128	0,129	0,130	0,131	0,133	0,135	0,134
кэсп	1,030	1,016	1,037	1,021	1,026	1,035	1,041	1,061	1,077	1,072
красч	1,000	0,998	0,999	1,006	1,015	1,027	1,038	1,051	1,064	1,076
Дельта, %	2,916	1,776	3,660	1,501	1,064	0,848	0,249	0,995	1,270	-0,432

Найденные экспериментально добавочные коэффициенты сравнивались с расчетными поправочными коэффициентами, и находилось отклонение экспериментальных коэффициентов от расчетных.

На каждую гармонику было произведено по 3 измерения, в таблицу внесены средние действующие значения тока и напряжения.

Из анализа данных, приведенных в таблице, видно, что отклонение поправочного коэффициента от расчетного составляет от -2 до +3%.

Кроме того, на выходы источника подавались токи сложной формы с различным гармоническим спектром. Например, на рис. 3-4, показан ток фазы А и ток нулевого рабочего проводника при подаче:

- фаза А: 1 гармоника – 100% от амплитуды, 3-я – 15%, 5-я – 15%;
- фаза В: 1 гармоника – 100% от амплитуды, 3-я – 20%, 7-я – 20%;
- фаза С: 1 гармоника – 50% от амплитуды, 2-я – 10%, 3-я – 15%.



Рис. 3. График тока и напряжения в нулевом рабочем проводнике при подаче сигнала сложной формы

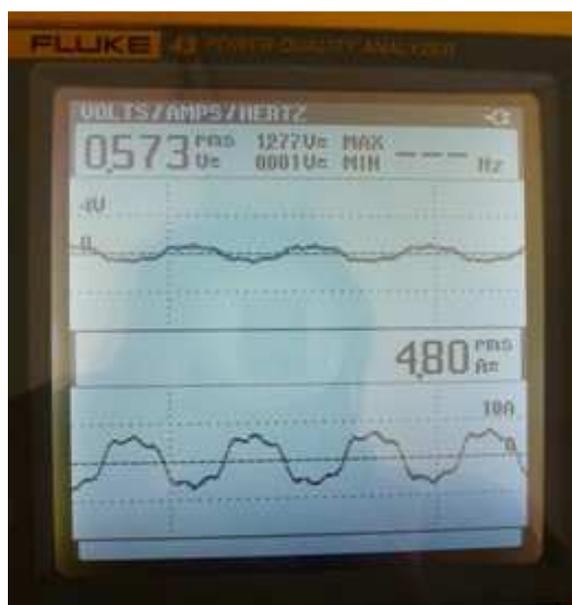


Рис. 4. График тока и напряжения в фазе А при подаче сигнала сложной формы

Для подтверждения адекватности разработанной методики были произведены теоретические расчеты с заданными характеристиками, представленными выше.

Форма кривой тока в нулевом рабочем проводнике приведена на рис. 5.

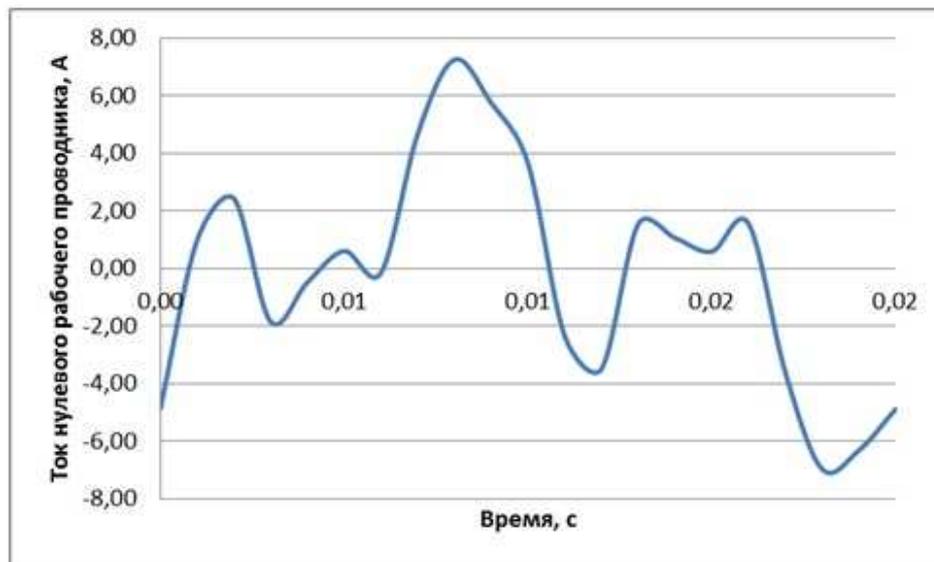


Рис. 5. Теоретически рассчитанная форма тока в нулевом рабочем проводнике

Действующее значение тока в фазе А составило 4,94 А, в нулевом рабочем проводнике - 3.81 А. Отклонение от экспериментальных данных соответственно составило 2.92% и 4.4%.

Расчетная форма кривой тока нулевого рабочего проводника совпадает с формой кривой тока, показанной на рис.3, полученной при экспериментальном исследовании.

Потери мощности в нулевом рабочем проводнике при расчете составили 1,75 Вт, экспериментальные данные – 1,4 Вт, в фазе А – 3,12 Вт и 2,75 Вт соответственно. Такой расхождение объясняется высокой погрешностью измерения активной мощности анализатором качества электроэнергии Fluke 43.

Выводы:

1. Существующие методики расчета добавочных потерь мощности не позволяют одновременно оценить суммарные потери, как от нелинейной, так и от несимметричной нагрузки. В связи с этим возникает необходимость создания методики расчета, учитывающей оба этих фактора;

2. Предложена методика расчета добавочных потерь мощности, учитывающая как потери в фазных проводах, так и в нулевом рабочем проводнике с учетом влияния токов высших гармоник и несимметрии нагрузки;

3. Проведен лабораторный эксперимент, подтверждающий предложенную теоретическую методику расчета. Отклонение экспериментальных добавочных коэффициентов от расчетных не превышало $\pm 3\%$.

Список литературы

1. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев: Наукова думка, 1985. 268 с.
2. Люতারевич А.Г., Вырва А.А., Долингер С.Ю., Осипов Д.С., Четверик И.Н. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах системы электроснабжения // Омский научный вестник. №1(77). 2009. С. 109-113.
3. Дед А.В. Определение потерь мощности в распределительных сетях с учетом влияния несимметричной нагрузки // Омский научный вестник. №2(80). 2009. С. 167-170.
4. Каменский М.К., Холодный С.Д. Силовые кабели 1-10 кВ с пластмассовой изоляцией. Расчет активного и индуктивного сопротивлений // RusCable [Электронный ресурс] URL: https://www.ruscable.ru/article/silovye_kabeli_1-10_kv_s_plastmassovoy_i (дата обращения 17.07.2018).

Белицкий Антон Арнольдович, ассистент, belitskiy.anton@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет,

Шклярский Ярослав Элиевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, js-10@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет

EVALUATION OF ADDITIONAL POWER LOSSES IN ELECTRIC NETWORKS WITH NONLINEAR AND NON-SYMMETRIC LOAD

A.A. Belitskiy, Y.E. Shklyarskiy

Various methods for estimating the additional losses in the cable under conditions of either a nonlinear or an asymmetric load are considered. A technique for calculating the additional losses in conditions of the work of both nonlinear and non-symmetrical loads is proposed. A laboratory experiment confirming the effectiveness of the developed technique is described.

Key words: high harmonic, asymmetry, loss, power, power loss, cable, zero conductor.

Belitskiy Anton Arnoldovich, assistant, belitskiy.anton@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg mining university,

Shklyarskiy Yaroslav Elievich, doctor of technical science, professor, head of chair, js-10@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg mining university

ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ И ФАЗЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

А.А. Михайлов, А.Д. Прасько, И.В. Троценко

Статья посвящена разработке алгоритма и устройства оценки частоты и фазы синусоидальных электрических колебаний. С целью минимизации искажений нелинейного характера, и соответственно повышения точности оценки частоты и фазы синусоидальных электрических колебаний в статье предложено использовать алгоритм оценки, основанный на использовании математических методов с применением линейных операций. Рассмотрена реализация разработанных алгоритмов выделения частоты и фазы на базе линейных аналоговых устройств.

Ключевые слова: математический метод и устройство оценки частоты и фазы синусоидальных электрических колебаний.

В настоящее время измерение частоты и фазы электрических синусоидальных колебаний основано на использовании метода непосредственного измерения (непосредственного отчета или непосредственной оценки) для аналоговых измерительных приборов и применения различных операций цифрового кодирования для цифровых измерительных приборов.

Данные методы измерения не всегда в полной мере современному уровню развития электротехнических систем, так как с увеличением частоты измеряемого колебания точность измерения падает [1].

Особенностью современного развития электротехнических устройств и в особенности измерительной техники является широкое внедрение цифровых систем. В связи с этим целесообразно операции по оценке и соответственно регулировке параметров электрических синусоидальных колебаний осуществлять с использованием математических методов.

Рассмотрим способ определения частоты и фазы электрических синусоидальных колебаний на основе линейных операций, которые исключают искажения нелинейного характера.

Синтез способа оценки частоты и фазы синусоидальных электрических колебаний

Оценка частоты синусоидальных электрических колебаний

Сущность способа оценки частоты электрических синусоидальных колебаний сводится к следующему [2], как известно

$$U_{\text{вх}}(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где ω - циклическая частота; φ - начальная фаза входного колебания; U_m - коэффициент, пропорциональный амплитуде входного колебания.

Проведем одновременно операцию дифференцирования и интегрирования по времени входного колебания (1).

$$K^D(t) = \frac{d U_{ex}(t)}{dt} = \frac{d U_m \sin \omega t}{dt} = U_m \omega \cos \omega t, \quad (2)$$

$$K^I(t) = \int U_{ex}(t) dt = \int U_{ex} \sin \omega t = -\frac{U_{ex}}{\omega} \cos \omega t, \quad (3)$$

Разделив результат дифференцирования входного сигнала (2) на результат интегрирования (3), получим [3]

$$K = \frac{K^D(t)}{K^I(t)} = \frac{U_{ex} \omega \cos \omega t}{-\frac{U_{ex}}{\omega} \cos \omega t} = -\omega^2, \quad (4)$$

Здесь K - есть некоторый коэффициент, пропорциональный квадрату частоты входного сигнала.

Выполнив инвертирование полученного значения (3), получим коэффициент $K_{инв} = \omega^2$, пропорциональный значению квадрата частоты входного сигнала.

Проведя операцию извлечения квадратного корня из значения $K_{инв}$ получим коэффициент $K_{вых1}$, пропорциональный непосредственно значению частоты входного сигнала.

$$K_{вых1} = \sqrt{K_{инв}} = \omega. \quad (5)$$

Таким образом, преобразовав электрическое колебание в соответствии с математическими операциями (1) - (5), получим напряжение $K_{вых1}$, величина которого пропорциональна частоте электрического синусоидального колебания.

Функциональная схема блока оценки частоты электрического синусоидального колебания реализующего выражения (1) - (5) представлена на рис.1.

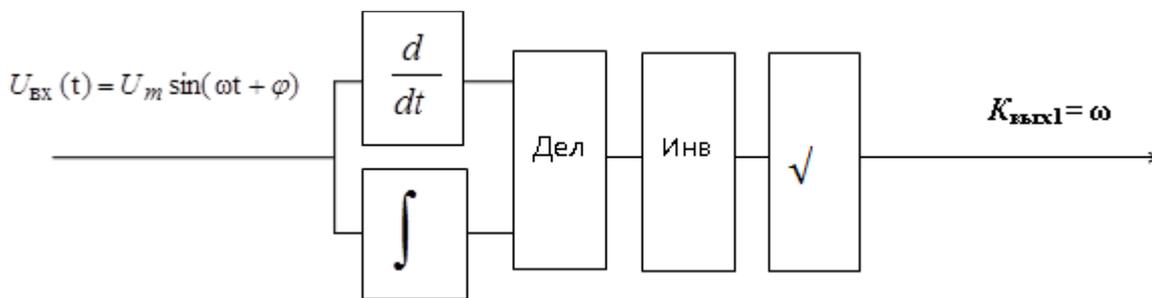


Рис. 1. Функциональная схема блока оценки частоты

Оценка фазы синусоидальных электрических колебаний

Частота синусоидального электрического колебания ω является производной по времени от фазы сигнала и, наоборот, фаза сигнала явля-

ется интегралом по времени от частоты [4], следовательно, проинтегрировав сигнал с выхода блока оценки частоты оцениваемого колебания получим напряжение $K_{\text{ВЫХ2}}$ пропорциональное его фазе φ .

Реализация устройства оценки частоты и фазы синусоидальных электрических колебаний

Представленные алгоритмы выделения частоты и фазы можно реализовать как аппаратным, так и программным путем на базе цифрового процессора.

Рассмотрим реализацию данного алгоритма (рис. 2) на базе линейных аналоговых устройств.

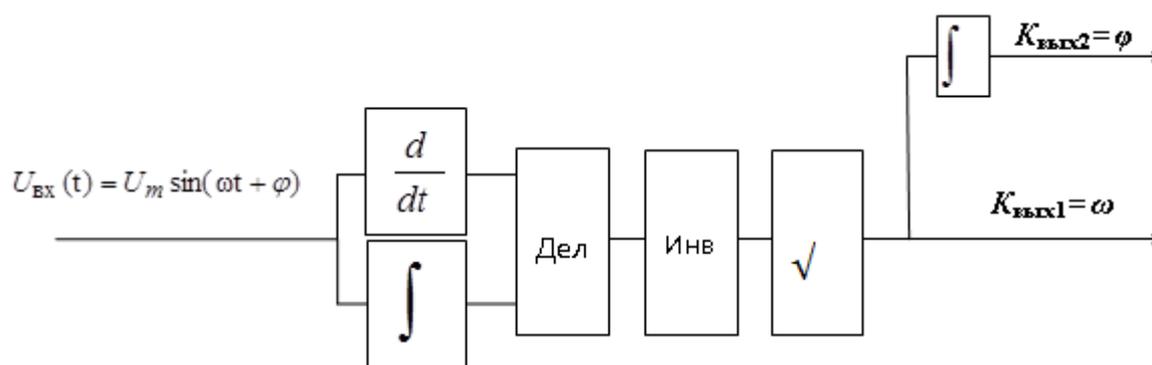


Рис. 2. Функциональная схема блока оценки частоты и фазы на базе линейных аналоговых устройств

Предлагаемое устройство работает следующим образом. Сигнал $U_{\text{ВХ}}(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, фаза и частота, которого оценивается предлагаемым устройством, подается одновременно на входы дифференциатора и интегратора. После параллельного дифференцирования и интегрирования сигнал поступает на делитель, где после деления поступает на вход инвертора. В инверторе у сигнала исчезает знак минус и сигнал, пропорциональный квадрату частоты ω^2 подается на устройство извлечения корня $\sqrt{\quad}$ на выходе которого получим коэффициент $K_{\text{ВЫХ1}}$, пропорциональный значению собственно частоты входного сигнала. Одновременно с выхода устройства извлечения корня $\sqrt{\quad}$ сигнал поступает на вход интегратора, на выходе которого получим коэффициент $K_{\text{ВЫХ2}}$, пропорциональный значению фазы φ входного сигнала.

Таким образом, на вход предлагаемого устройства подается сигнал $U_{\text{ВХ}}(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, а на выходе формируется в соответствии с приведенными выражениями сигналы пропорциональные значениям частоты ω и фазы φ входного сигнала.

Заключение

Отличительным признаком предложенных способов определения частоты и фазы колебаний является то, что обработка оцениваемого синусоидального электрического колебания осуществляется в соответствии с математическими операциями линейного характера, что предопределяет высокую точность и минимум искажений [5].

Список литературы

1. Михайлов А.А., Грошев А.Е., Прасько А.Д. Определение амплитуды гармонических колебаний с использованием математических методов // Известия вузов Сев.-Кавк. региона. Технические науки, 2014. №6. С. 143-145.
2. Михайлов А.А., Грошев А.Е., Прасько А.Д. Вычислительный комплекс определения параметров гармонических сигналов в электротехнических и энергетических системах // Известия вузов Сев.-Кавк. Региона. Технические науки, 2015. № 3. С. 22-27.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Издательство «Наука», 1973. 832 с.
4. Теория электрической связи: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 452 с.
5. Теплов Н.Л., Куделин Е.Н., Лежнюк О.П. Нелинейные радиотехнические устройства: учебник для вузов / Под ред. Н.Л. Теплового. М.: Воениздат, 1982. 352 с.

Михайлов Анатолий Александрович, д-р техн. наук, профессор, mih01@mail.ru Россия, Новочеркасск, Южно - Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,

Прасько Александр Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент, nvis65@mail.ru, Россия, Новочеркасск, Южно - Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,

Троценко Игорь Викторович, канд. техн. наук, доцент, inf-npi@mail.ru Россия, Новочеркасск, Южно - Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

ASSESSMENT OF THE FREQUENCY AND PHASE OF SINUSOIDAL ELECTRIC VIBRATIONS

A.A. Mikhailov, A.D. Prasko, I.V. Trotsenko

The article is devoted to the development of an algorithm and device for estimating the frequency and phase of sinusoidal electrical oscillations. In order to minimize the distortion of a nonlinear nature, and thus improve the accuracy of the evaluation of the frequency

and phase of sinusoidal electrical oscillations in the article proposed to use the evaluation algorithm based on the use of mathematical methods with the use of linear operations. The implementation of the developed algorithms of frequency and phase separation on the basis of linear analog devices is considered.

Key words: mathematical method and device for estimation of frequency and phase of sinusoidal electric oscillations.

Anatoly Anatoly Mikhailov, doctor of technical sciences, professor, mih01@mail.ru, Russia, Novocherkassk, South - Russian state Polytechnic University (SPI) named after M. I. Platov,

Prasko Alexander Dmitriyevich, candidate of technical sciences, docent, nvis65@mail.ru, Russia, Novocherkassk, South - Russian state Polytechnic University (SPI) named after M. I. Platov,

Trotsenko Igor Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, inf-npi@mail.ru, Russia, Novocherkassk, South - Russian state Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 658.562; 664; 303.724.32.032.2

ВЫБОР ПРОСТОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДИФФУЗИИ САХАРОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

В.В. Прейс, В.Б. Морозов, Т.Г. Морозова

Приведены результаты эксперимента по обессахариванию стружки, проведена их оценка, построены простые регрессионные модели зависимости сахароотдачи от длительности процесса диффузии, осуществлён выбор лучших статистических моделей.

Ключевые слова: статистическая оценка, построение модели, простая регрессия, сравнение моделей, сахарное производство, резание, диффузия, обработка результатов эксперимента.

На кафедре «Технологические системы пищевых, полиграфических и упаковочных производств» Тульского государственного университета на базе лаборатории средств технохимического контроля были приведены комплексные исследования. Целью проведения эксперимента было определение оптимальной толщины свекловичной стружки, обеспечивающей максимальные величины извлечённых сахаристых веществ при условии незначительного или минимального содержания несахаров, в том числе механических включений.

Исходя из рекомендованных теоретических значений толщины свекловичной стружки в 0,5-1,0 мм [11] и аналогичных производственных величин – 4-6 мм подтверждалась величина 4 мм, полученное по среднему значению наибольших чисел интервалов. Использовалась рекомендованная температура 75 °С.

Эксперимент реализовывался по разработанному авторским коллективом алгоритму (рис. 1). Алгоритм имеет следующие обозначения: τ – время диффузии, мин; l – длина трубки в поляризационном исследовании, см; t – температура диффузии, °С; m – масса навески, кг; d – толщина стружки, мм; C – мутность, мл/дм³; S – сахаросодержание, %; i – счётчик измерений.

Плоды сахарной свёклы предварительно тщательно промывались, проводилась визуальная оценка в рамках общего органолептического анализа. Для качественного эксперимента удалялась розетка (головка) плода, различные примеси и мезга, приготавливались равноразмерные части [7].

Исходные параметры проведённого эксперимента: τ – 30, 45 и 60 мин; l всегда 20 см; t , соответственно, 75 °С; m в пределах 0,1 кг; d – 0,5, 0,75, 1,0, 1,25 и 4 мм. Длительность процесса на производстве исчисляется несколькими часами, что сложно осуществить в лабораторных условиях. Использовались величины продолжительности процесса диффузии в наиболее показательных значениях.

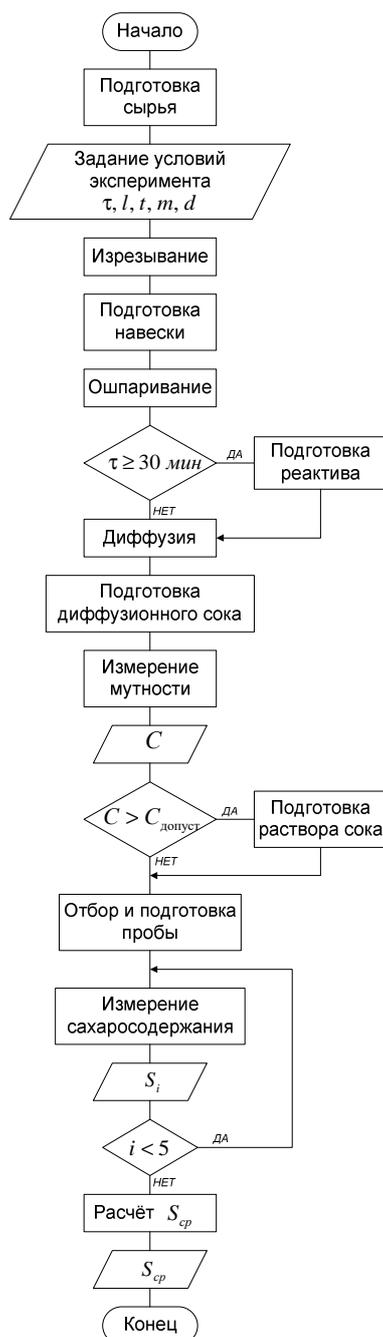


Рис. 1. Алгоритм процедуры эксперимента (упрощённый) [5]

С целью более эффективного диффузионного воздействия на поверхность стружки применялось ошпаривание, которое разрушало внешнюю оболочку стружки, приводило к выравниванию температур перед экстракцией, а также сохраняло диффузионный сок в более светлой и прозрачной цветовой и световой гаммах. При этом инновационно [12] использовалась лимонная кислота, имеющая осветляющее воздействие на раствор без изменения величины сахаросодержания. Ошпаривание проводилось температурой воды 100 °С.

Процесс диффузии осуществлялся в специализированных установках, обеспечивающих герметичность и сохранение температурного баланса на всём протяжении экстрагирования сахаристых и иных веществ из стружки посредством растворителя (воды) [6].

При подготовке диффузионного сока обеспечена его очистка от крупных механических включений и резервирование в специальный тарированный резервуар.

Проводимый отбор и подготовка проб происходило с использованием современных устройств [2, 3]. Они обеспечивали усреднение материала перемешиванием и отбор определённого количества раствора для экспериментального инструментального измерения [4, 14].

Контроль качества [1] проходил пятикратно для обеспечения статистической достоверности при применении оптических приборов и работы экспериментаторов. При этом использована специально разработанная методика пересчёта [9].

Выходом описанного алгоритма являлись усреднённые величины сахаросодержания.

Оценивалась зависимость сахаросодержания (%) в диффузионном соке при определённой толщине стружки от длительности процесса экстракции. Сводные результаты и графические интерпретации представлены в табл. 1 и рис. 2.

Таблица 1

Оценка сахаросодержания в зависимости от длительности процесса диффузии (абсолютное значение, % / отклонение от базы, %)

Толщина стружки, мм	Время диффузии, мин		
	30	45	60
0,50	25,72	21,64	23,54
	0 – база	-15,86	-8,48
0,75	22,89	25,94	26,64
	0 – база	13,32	16,38
1,00	20,28	20,34	30,65
	0 – база	0,30	51,13
1,25	16,68	20,11	20,98
	0 – база	20,56	25,78

За базовые значения сахаросодержания принимается величина первого экспериментального измерения, отклонение от базы здесь всегда принималось за 0.

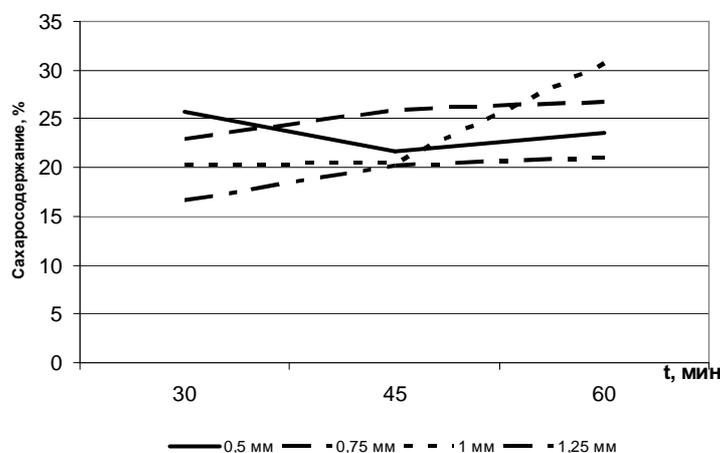


Рис. 2. Изменение сахаросодержания в свёкле по различным толщинам в зависимости от длительности процесса диффузии

Анализ результатов [8] указывает на то, что при большей длительности процесса диффузии – экстракции сахаров в растворитель, т.е. процент сахароотдачи растёт. В среднем на каждый шаг проведённого эксперимента приходится рост контролируемых значений +4,58 % и +21,20 %. Таким образом, численно подтверждается важность большей длительности процесса экстракции с точки зрения выделения большего объёма сахаристых веществ в процессе технологического производства. Дополнительно отмечено, что для больших толщин наблюдается характерно более динамичное получение сахара, т.е. производительности процесса диффузии. Это можно объяснить физико-химическими свойствами и особенностями экстракции, связанной с проникновением в толщу материалов. При этом следует учитывать, что при меньшей толщине стружки, охват и максимальное вымывание сахаров наблюдается уже на ранних стадиях процесса и малоизменяется в дальнейшем. При больших толщинах рост длительности процесса экстракции позволяет обеспечить более полный охват объёма каждой единичной стружки, что постоянно приводит к росту сахароотдачи (рис. 2).

Общий анализ табл. 1 указывает на то, что сахароотдача становится более эффективной при меньшей толщине стружки и большей длительности процесса. При этом расхождения для различных условий в среднем укладываются в интервал статистических погрешностей, что может свидетельствовать об отсутствии статистически значимых отличий в задаваемых технологией резания геометрических параметрах стружки (в первую очередь – толщину). В целом, из выбранного интервала наиболее употребимым следует принять величину толщины стружки 1 мм [10].

Для значений более 0,5 мм заметен прогресс сахароотдачи при увеличении длительности процесса, что соответствует логическому восприятию диффузии. Величина 0,5 мм показывает разнонаправленные тенденции, характерные для сложных процессов в силу влияния многочисленных факторов: от трудной выполнимости нарезки такой тонкой стружки, до сложный биомеханических и химических процессах.

Возникает задача определения модели закона описываемой зависимости в рамках простой регрессии, который смог бы коррелировать результаты эксперимента. В силу того, что реальные значения толщин имеют более широкий диапазон, например 4-6 мм, а также неявный характер начального момента процесса, авторами предложены варианты значений, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Статистика сахаросодержания по пяти контрольным точкам толщин свекловичной стружки, %

Толщина стружки, мм	Время диффузии, мин				
	0	30	45	60	75
0,75	0	22,89	25,94	26,64	27,92
1,00	0	20,28	20,34	30,65	31,18
1,25	0	16,68	20,11	20,98	22,03

При построении табл. 2 были использованы значения сахаросодержания в диффузионном соке по различным толщинам в зависимости от длительности процесса диффузии, представленным в табл. 1. Для начальных величин времени длительности процесса определены нулевые значения сахароотдачи (сахаросодержания в растворе), т.е при отсутствии процесса в растворе сахара нет. Для больших длительностей определён диапазон предельного отклонения в большую сторону в значении вероятности статистической ошибки в 5 % при асимптотическом поведении кривой [13].

Для таких величин были осуществлена процедура сравнения альтернативных моделей, осуществлённая на оценке коэффициентов корреляции и детерминации. Результаты представлены в табл. 3.

Величина коэффициента корреляции традиционно должна стремиться к 1, при фактически функциональной зависимости для всех результатов эксперимента. При этом для приемлемых моделей предполагается, что коэффициент детерминации должен быть хотя бы не меньше 50 %. Модели с коэффициентом детерминации выше 80 % можно признать достаточно хорошими, если коэффициент корреляции превышает 0,9.

Таблица 3

Сравнение альтернативных простых корреляционных моделей

Толщина	Вид модели	Коэффициент		Лучшая модель (+)
		корреляции	детерминации, %	
0,75	квадратный корень	0,9790	95,85	+
	линейная	0,8912	79,42	
	квадратичная	0,8557	73,25	
1,00	квадратный корень	0,9823	96,49	+
	линейная	0,9598	92,12	
	квадратичная	0,9123	83,23	
1,25	квадратный корень	0,9881	97,63	+
	линейная	0,9141	83,56	
	квадратичная	0,8707	75,81	

Как видно из табл. 3, наиболее качественно отражающими экспериментальные значения моделями является функции квадратного корня для всех значений толщин:

для $d=0,75$ –

$$S = 1,45686 + 3,36132 \tau^{0,5},$$

для $d=1,00$ –

$$S = -0,30602 + 3,63673 \tau^{0,5},$$

для $d=1,25$ –

$$S = 0,806321 + 2,65002 \tau^{0,5}.$$

Прочие модели так же интересны для оценки и могут быть интерпретированы для конкретных случаев, например, для длительности более нескольких часов, что характерно для реального технологического процесса производства сахара их плодов сахарной свёклы.

Для большей адекватности выбираемых статистических зависимостей простой регрессионной модели [15] рекомендуется расширение экспериментальных длительностей процесса в сторону увеличения их в интервал до 90-150 мин. Такая задача является перспективной для дальнейших экспериментальных изысканий.

Графическая интерпретация построенных простых регрессионных моделей для функций квадратного корня представлена на общем рис. 3 для всех трёх величин получаемой резанием толщины свёклы.

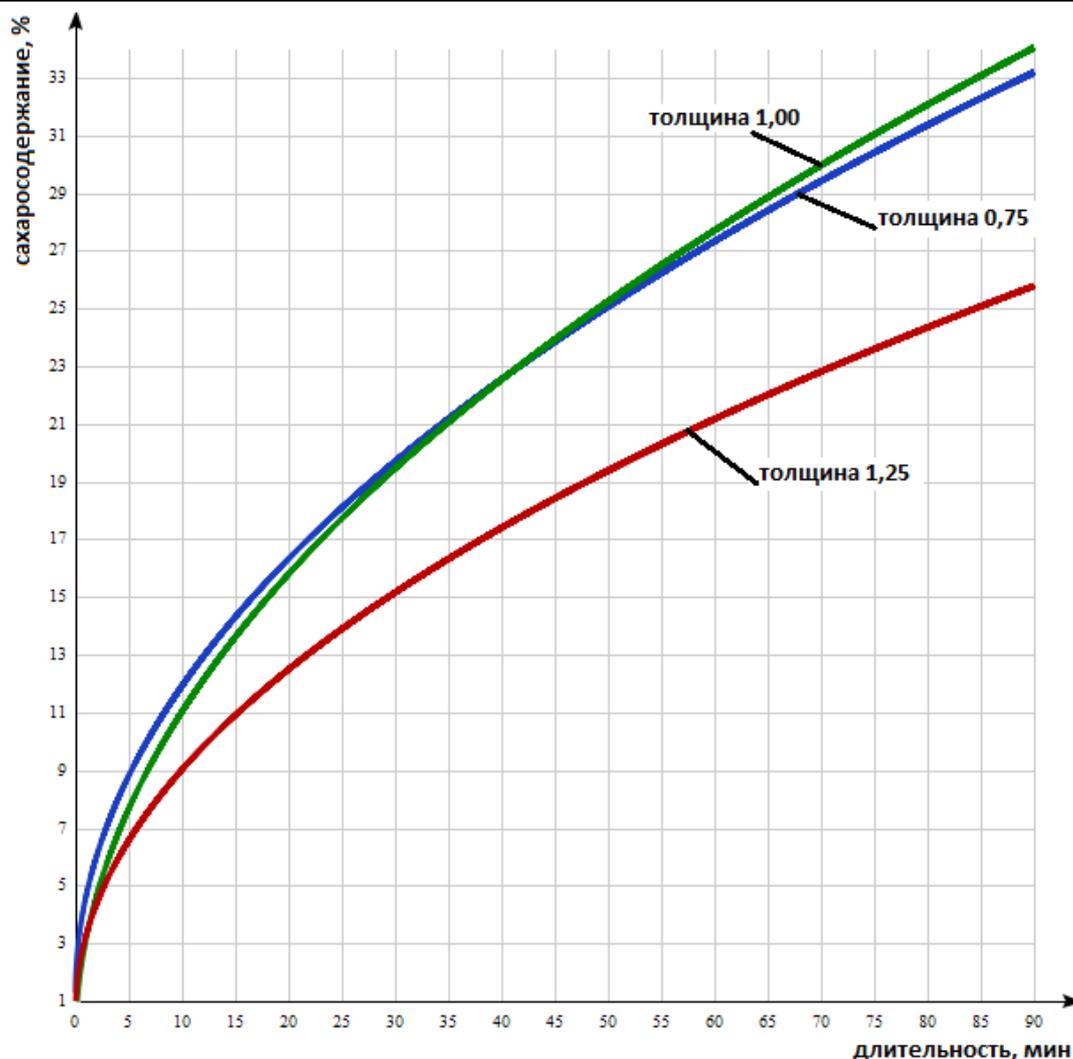


Рис. 3. Построение графиков функций для построенных моделей в зависимости от толщины стружки сахарной свёклы

Построенные модели наиболее близки к экспериментальным значениям и имеют большую вероятность генерирования промежуточных значений величин длительности процесса экстракции сахара из свекловичной стружки. При этом учтены начальные условия, что позволило увеличить статистическую значимость оценки результатов эксперимента по резанию плодов и экстракции из стружки сахаров в лабораторных условиях.

Список литературы

1. Горелов А.С., Прейс В.В., Сосков В.Б. Принципы построения интегрированной системы автоматизированного статистического контроля качества машиностроительной продукции // СТИН. 2007. № 12. С. 2-5.
2. Горелов А.С., Прейс В.В., Сосков В.Б. Пробоотборник жидкости из трубопровода // Патент на полезную модель RUS 55132 06.03.2006

3. Горелов А.С., Прейс В.В., Сосков В.Б. Устройство отбора проб из открытого потока жидкости // Патент на полезную модель RUS 56616 19.04.2006.

4. Горелов А.С., Прейс В.В., Сосков В.Б. Устройство сокращения сыпучих проб // Патент на полезную модель RUS 55135 06.03.2006.

5. Морозов В.Б. Анализ технологической операции измельчения в свеклосахарном производстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 1. С. 214-220.

6. Морозов В.Б. Анализ функционально-структурных компонентов машин сельскохозяйственного назначения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 1. С. 23-28.

7. Морозов В.Б. Исследование процесса измельчения сырья пищевых и перерабатывающих производств в стружку с разработкой инновационных подходов и средств для их реализации / сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК» в рамках XIX Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал» – 2012. Ставрополь: Изд-во «Агрус», 2012. С. 215-222.

8. Морозов В.Б. Экспериментальная оценка варьируемых геометрических размеров свекловичной стружки в технологических системах процессов сахарного производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 10. С. 150-159.

9. Морозов В.Б., Морозова Т.Г. Методологическое и техническое обеспечение процесса получения репрезентативных проб // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 7. Ч. 2. С. 14-21.

10. Саввина Е.А., Морозов В.Б., Морозова Т.Г. Экспериментально-расчётное обоснование геометрических параметров резания корнеплодов // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 4 (17). С. 20-27.

11. Сапронов А.Р. Технология сахарного производства: учебник для студ. вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Колос, 1999. 495 с.

12. Сосков В.Б. Научная и академическая оценка актуальности, сути и проблем инновационной деятельности России // «Инженерное образование». Вып. 5. 2009. С. 92-97.

13. Сосков В.Б. Представительность процесса пробоотбора нештучной продукции // Автоматизация. Современные технологии. 2005. № 7. С. 36-37.

14. Сосков В.Б. Принцип совмещения операций в новом устройстве отбора проб жидкостей // Вестник машиностроения. 2004. № 8. С. 84.

15. Gorelov A.S., Preis V.V., Morozov V.B. // Design principles for integrated automated statistical quality-control systems in manufacturing // Russian Engineering Research. 2008. Т. 28. № 3. С. 251-254.

Прейс Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, rabota-preys@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Морозов Владимир Борисович, канд. техн. наук, доцент, qtay@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Морозова Татьяна Геннадьевна, аспирант, nusichka-89@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

*THE CHOICE OF SIMPLE REGRESSION MODEL
OF SUGARSDIFFUSION FOR CUTTING PROCESS OPTIMIZATION*

V.V. Preys, V.B. Morozov, T.G. Morozova

Results of an experiment on extraction of sugar from shaving are given, their assessment is carried out, simple regression models for amount of the dissolved sugar from diffusion process duration are constructed, the choice of the best statistical models is carried out.

Key words: statistical analysis, creation of model, simple regression, comparison of models, sugar production, cutting, diffusion, processing of results of an experiment.

Preys Vladimir Viktorovich, doctor of technical science, professor, rabota-preys@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Morozov Vladimir Borisovich, candidate of technical science, docent, qtay@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Morozova Tatiana Gennadjevna, postgraduate, nusichka-89@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ВЛИЯНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ГРИБОВ ASPERGILLUS NIGER НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИЧНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА МАРКИ «ЛИТА»

А.Д. Бреки, С.А.Семенов, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев, А.В. Лаврушин

*В работе приведены результаты лабораторных исследований влияния микроскопических грибов вида *Aspergillus niger* на триботехнические свойства пластичного смазочного материала марки «ЛИТА». Установлено, что пластичный смазочный материал «ЛИТА» не является грибостойким. Показано, что в случае наличия *Aspergillus niger* в смазочной среде происходит ухудшение стабильности процесса трения, что выражается в увеличении разброса регистрируемых в опыте значений силы трения.*

*Ключевые слова: трение, износ, пластичный смазочный материал, *Aspergillus niger*, смазочный слой, биоповреждение, ветвящийся мицелий.*

Известно, что проблема биоповреждений горюче-смазочных материалов, существующая с момента их создания и начала использования, не утратила своей актуальности в настоящее время. Присутствие даже незначительного количества воды (0,01-0,02% или даже ее следов), минеральных загрязнений и благоприятная температура (от 3-15 до 35-40 °С и выше) в нефтепродуктах даёт возможность активно развиваться различным группам микроорганизмов [1]. Скорость и глубина микробиологического окисления нефтепродуктов зависят от их углеводородного состава. При этом, нефтепродукты, содержащие меньшее количество живых организмов, проявляют более высокую биостойкость, чем продукты, содержащие их в большем количестве. Только 30 – 40% микроорганизмов, выделенных из нефтепродуктов, способны разрушать масла, а остальные находятся в пассивной форме [2]. Известно, что углеводороды, имеющие линейное строение молекул, быстрее разрушаются активными микроорганизмами, чем их разветвленные изомеры. Алифатические (парафиновые) углеводороды чаще менее биостойкие, чем ароматические, поэтому и топлива, содержащие в основном парафиновые углеводороды, могут разрушаться активными микроорганизмами быстрее, чем содержащие большее количество ароматических соединений. Среди различных видов нефтяных топлив более биостойкие – легкие дистилляционные топлива – бензины, менее стойкие керосины [1, 3]. Подвержены биоповреждениям не только смазочные масла и топлива, но и пластичные смазочные материалы (ПСМ) различного состава и назначения [4, 5]. Особое место среди них занимают пластичные смазочные материалы триботехнического назначения. Влияние микроорганизмов на триботехнические свойства ПСМ изучено ещё недостаточно, в связи с чем необходимо проведение исследований в данном направлении, поскольку от качества ПСМ зависит надёжность работы различных машин и механизмов.

Материалы и методы исследования

В границах данной работы приведены результаты исследований трения скольжения одного шара из стали марки ШХ15 по трём таким же покоящимся шарам в среде базового смазочного материала марки «ЛИТА» и в среде этого же ПСМ, содержащего ветвящийся мицелий грибов *Aspergillus niger* (рис. 1).

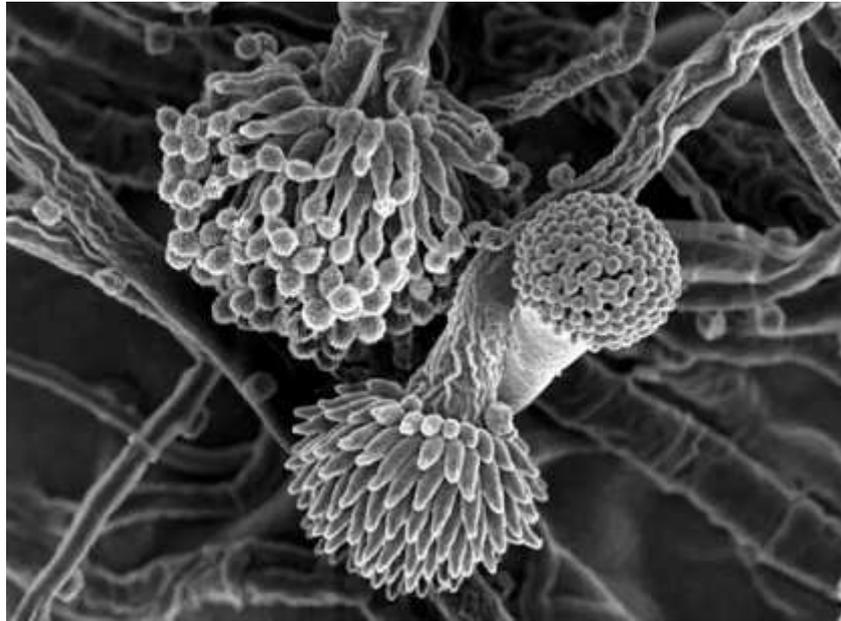


Рис. 1. Внешний вид Aspergillus niger

Грибы *aspergillus niger* способны прижиться и разрастись в колонию даже при температуре свыше $+40^{\circ}\text{C}$. Споры *Aspergillus niger* присутствуют повсеместно, кроме областей полной стерильности или вакуума.

Пластичный смазочный материал «ЛИТА» относится к морозостойким, многоцелевым смазкам, предназначенным для применения в различных ответственных узлах трения: в подшипниках качения и скольжения, нагруженных зубчатых передачах, направляющих и других механизмах, эксплуатируемых под открытым небом в зимнее и летнее время во всех климатических зонах. Температурный интервал применения ПСМ «ЛИТА» достаточно широк: от минус 50°C до плюс 100°C . С учётом такой широкой области применения и условий эксплуатации, «ЛИТА» является потенциальной благоприятной средой для жизни колонии *Aspergillus niger*.

Перед проведением триботехнических исследований определили грибостойкость ПСМ «ЛИТА» в соответствии с ГОСТ 9.052-88 (метод 1) с увеличением срока инкубирования заражённых грибами образцов свыше 90 суток при температуре $+29\pm 2^{\circ}\text{C}$. Образцы смазки «ЛИТА», нанесённые на дно чашек Петри, заражали водной суспензией спор грибов, выдерживали в условиях, оптимальных для развития грибов, с последующим визу-

альным определением признаков их развития на образцах (грибостойкости). Смазка является грибостойкой (ГОСТ 9.052-88, метод 1), если после 56 суток инкубирования признаки развития грибов на образцах отсутствуют при осмотре под микроскопом при 50-60-кратном увеличении. После проведения осмотра были обнаружены признаки развития *Aspergillus niger*.

Полученные образцы – базовый ПСМ «ЛИТА» и «ЛИТА + *Aspergillus niger*» использовали для триботехнических исследований.

Испытания образцов проводили по схеме, реализуемой на четырёхшариковой машине трения (рис.2).

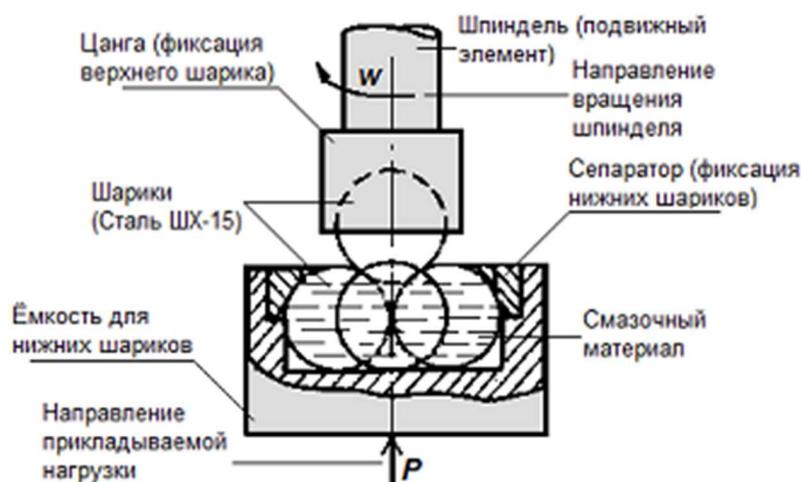


Рис. 2. Схема испытаний на четырёхшариковой машине трения

Элементами узла трения являются 4 шарика подшипников ГОСТ 3722, выполненные из материала «сталь ШХ15», диаметром 12,7 мм. Три шарика закладывали в нижнюю ёмкость и жёстко фиксировали с помощью сепаратора и гайки. Далее в ёмкость с шариками закладывали испытуемые смазочные материалы ПСМ «ЛИТА» и «ЛИТА + *Aspergillus niger*». В шпинделе устанавливали цапгу с верхним шариком, после чего устанавливали его контакт с нижними шариками через ПСМ под нагрузкой 200Н. Далее приводили в движение шпиндель с частотой вращения (1460 ± 70) мин⁻¹. Время одного испытания составляло 12 мин. В процессе каждого испытания регистрировалась сила трения. Трение реализовывалось в трёх площадках контакта (по Герцу) при движении по круговой траектории.

Результаты и их обсуждение

Вначале исследовали трение и износ шариков из стали ШХ15 в среде базового пластичного смазочного материала «ЛИТА». Зависимость силы трения скольжения от времени для ПСМ «ЛИТА» показана на рис. 3.

Аналитически данную зависимость для ПСМ «ЛИТА» можно выразить с использованием следующей функции:

$$F_{mp} = \frac{16,3}{1 + \exp(-5,2t)} + \frac{0,4}{1 + \exp(-0,2(t - 100))} + \frac{0,5}{1 + \exp(-0,3(t - 250))} + \frac{0,5}{1 + \exp(-0,2(t - 400))} - \frac{3,6}{1 + \exp(-0,12(t - 535))} - \frac{0,5}{1 + \exp(-0,2(t - 600))}. \quad (1)$$

Из (1) видно, что до значения $t \approx 535$ с сила трения несколько раз ступенчато увеличивается на небольшие величины, а затем скачкообразно падает и стабилизируется. На рис.4 показан график функции плотности вероятности величины силы трения в результате испытания ПСМ «ЛИТА». Аппроксимирующая функция плотности вероятности (функция Гаусса) на интервале до 535 с имеет вид:

$$f(F_{mp}) = \left(\frac{1}{0,66 \cdot \sqrt{2\pi}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{(F_{mp} - 17,1)^2}{2 \cdot (0,66)^2} \right). \quad (2)$$

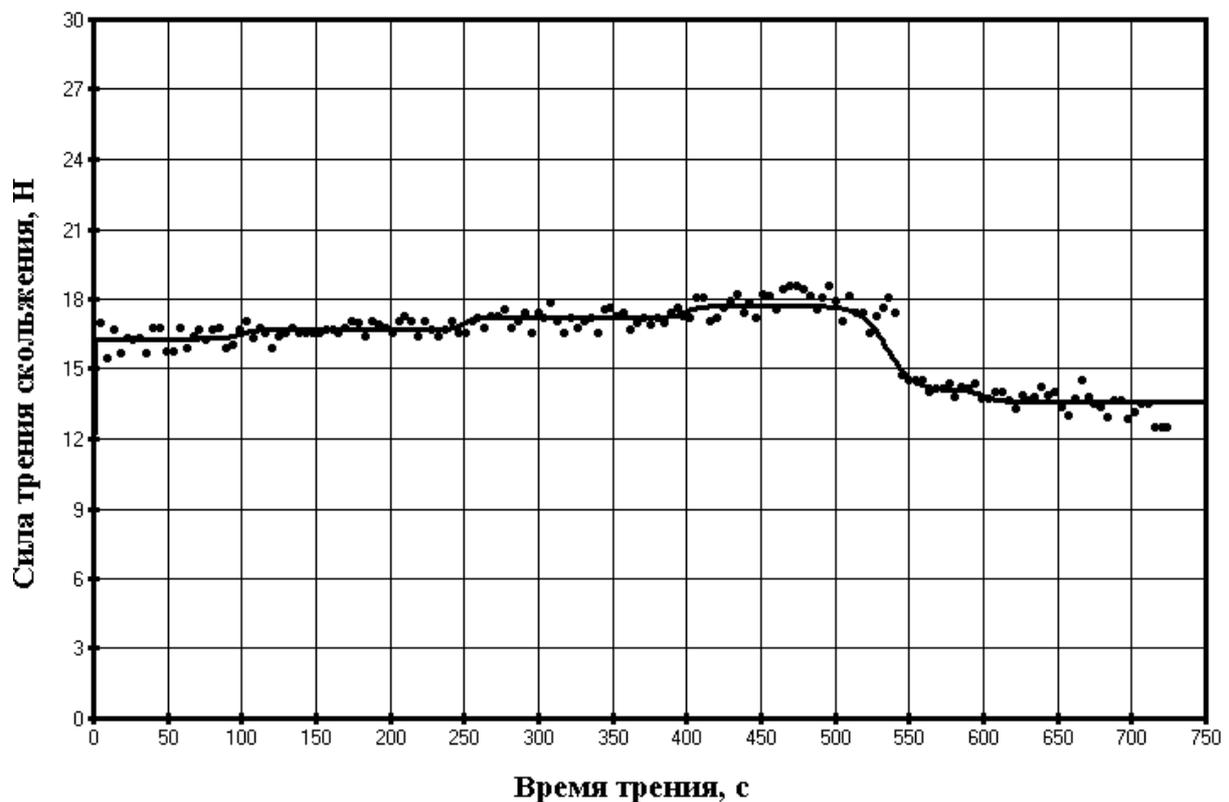


Рис. 3. Зависимость силы трения скольжения для ПСМ «ЛИТА» от времени фрикционного взаимодействия

Из (2) видно, что среднеквадратическое отклонение составляет 0,66 Н, а дисперсия силы трения составляет 0,436 Н. После 535 с среднее значение силы трения падает, среднеквадратическое отклонение составляет 0,571 Н, а дисперсия уменьшается до 0,326 Н (рис. 4).

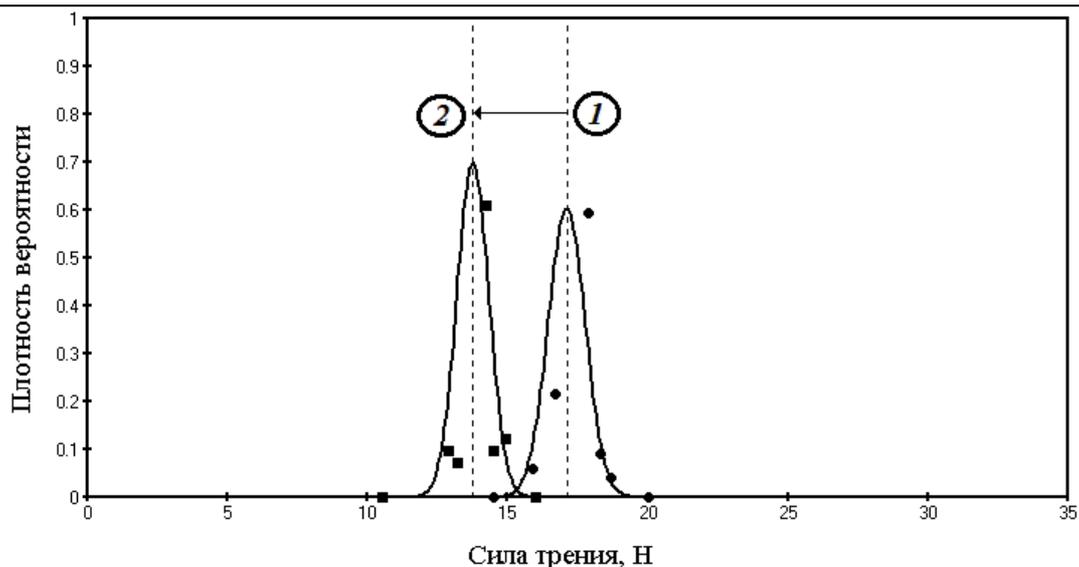


Рис.4. Плотность вероятности величины силы трения в результате испытания «ЛИТА»

Соответственно функция Гаусса после уменьшения силы трения:

$$f(F_{тр}) = \left(\frac{1}{0,2571 \cdot \sqrt{2\pi}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{(F_{тр} - 13,75)^2}{2 \cdot (0,571)^2} \right). \quad (3)$$

Зависимость силы трения скольжения от времени для ПСМ «ЛИТА+ Aspergillus niger» показана на рис. 5.

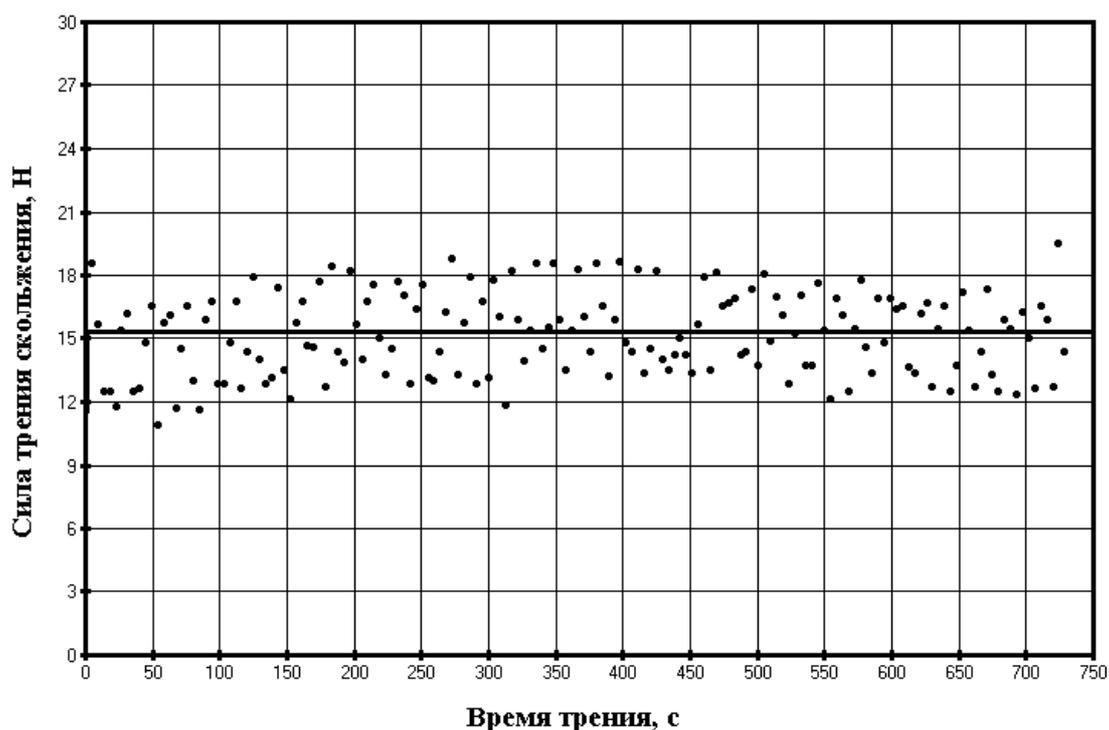


Рис. 5. Зависимость силы трения скольжения для ПСМ «ЛИТА+ aspergillus niger» от времени фрикционного взаимодействия

Аналитически данную зависимость для ПСМ «ЛИТА + Aspergillus niger» можно выразить с использованием следующей функции:

$$F_{mp}(t) = \frac{1}{1 + \exp(-5,2t)}. \quad (4)$$

График функции плотности вероятности для силы трения при испытании ПСМ «ЛИТА + Aspergillus niger» показан на рис. 6.

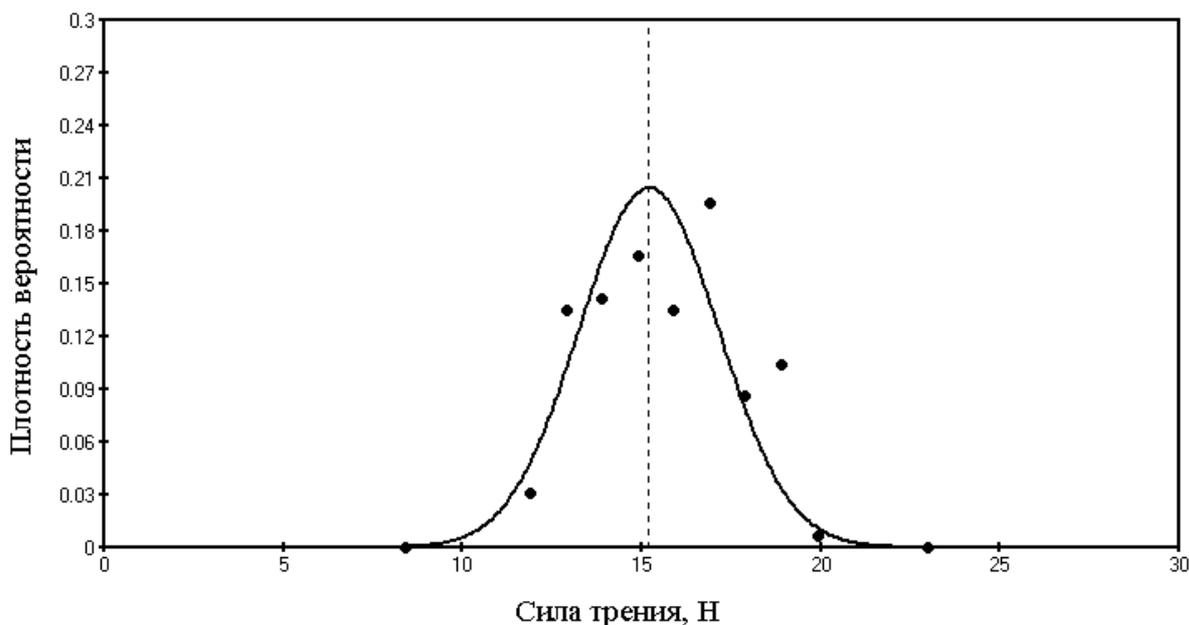


Рис. 6. Плотность вероятности величины силы трения в результате испытания «ЛИТА + Aspergillus niger»

Аппроксимирующая функция плотности вероятности в этом случае имеет следующий вид:

$$f(F_{mp}) = \left(\frac{1}{1,95 \cdot \sqrt{2\pi}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{(F_{mp} - 17,1)^2}{2 \cdot (3,8)^2} \right). \quad (5)$$

Из (5) видно, что среднеквадратическое отклонение составляет 1,95Н, а дисперсия силы трения составляет 3,8Н.

Диаметры лунок износа на нижних шариках, образовавшихся в результате испытаний ПСМ приведены в таблице.

Диаметры лунок износа на нижних шариках

№	ЛИТА	ЛИТА + Aspergillus niger
1	0,5мм	0,5мм
2	0,5мм	0,4мм
3	0,45мм	0,45мм

Из таблицы видно, что существенной разницы по противоизносным свойствам между испытываемыми образцами ПСМ не обнаружено.

Выводы

На основании проведённого лабораторного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. В результате испытаний пластичного смазочного материала ЛИТА в соответствии с ГОСТ 9.052-88 (метод 1) обнаружен ветвящийся мицелий грибов более чем на 50% поверхности, при этом отчётливо видны при увеличении $\times 50$ конидиеносцы с шаровидным вздутием и конидиями почти чёрного цвета, характерными для грибов вида *Aspergillus niger*, таким образом, смазка является не грибостойкой.

2. В результате сравнительных лабораторных триботехнических испытаний установлено, что наличие микроскопических грибов *Aspergillus niger* в смазке ЛИТА способствует повышению дисперсии силы трения в 8,7-11,7 раз. Такое увеличение говорит о снижении стабильности фрикционного взаимодействия, несмотря на то, что средние значения силы трения на интервале всего испытания близки по величине.

3. Износ, образовавшийся в результате испытания пластичного смазочного материала «ЛИТА» и «ЛИТА + *Aspergillus niger*» практически не отличается по величине, что может быть связано с дискретным экранированием поверхностей трения мицелием микроскопических грибов *Aspergillus niger*, несмотря на нарушение ими целостности смазочного слоя.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях механизма повреждаемости конструкционных материалов, средств их защиты в результате воздействия микроорганизмов-деструкторов, а также по созданию ресурсосберегающих процессов обработки материалов [6-18].

Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Ильичев В.Д. Биоповреждения: учеб. пособие для биолог. спец. / отв. ред. В.Д. Ильчев. М.: Высш. шк., 1987. 352 с.
2. Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич. Санкт-Петербург, 2011. 161 с.
3. Ямпольская Т.Д., Шахалай Т.В. Биоповреждения горюче-смазочных материалов в условиях северных регионов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. №1(5). С. 1250-1255.
4. Коррозия легированных сталей под консервационными смазками в присутствии микроорганизмов / А.С. Волков, Н.Е. Стариков, А.В. Мишаков, В.А. Алферов, Э.В. Пекар, С.Ф. Хлебникова // Защита металлов. 2003. Т. 39. № 4. С. 403-409.

5. Стариков Н.Е., Гвоздев А.Е., Фомичева Н.Б. Микробная коррозия сталей в присутствии консервационных составов // Коррозия: материалы, защита. 2005. № 1. С. 37-40.

6. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation // А.Е. Gvozdev, D.N. Bogolyubova, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 1. P. 32-40.

7. Role of nucleation in the of first-order phase transformations / А.Е. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 4. P. 283-288.

8. Синтез и триботехнические свойства композиционного покрытия с матрицей из полиимида (Р-ООО)ФТ и наполнителем из наночастиц дисульфида вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков, Ю.А. Фадин // Материаловедение. 2016. № 4. С. 44-48.

9. Стариков Н.Е., Григорьев И.А., Шевченко П.Г. Воздействие факторов окружающей среды на изменение свойств конструкционных материалов // Известия ТулГУ. Серия «Физика», 2005. Вып. 5. С. 184-192.

10. Стариков Н.Е., Виноградов С.Н. Исследования по повышению стойкости вооружения и военной техники к воздействию микробиологического фактора // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2012. Вып. 11. Ч. 1. С. 342-347.

11. Стариков Н.Е., Виноградов С.Н. Результаты комплексных исследований воздействия процессов коррозии и биоповреждений на материалы вооружения // «Оборонная техника». № 1-2. М.: Изд-во ФГУП «НТЦ «Информтехника», 2013. С. 57-65.

12. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / А.Е. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

13. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь. 2017. № 6. С. 26-39.

14. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, А.Е. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

15. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-ООО)ФТ polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, А.Е. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 32-36.

16. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 56-59.

17. Maximum plastic strengthening in tool steels / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, A.E. Cheglov, N.N. Sergeev, O.M. Gubanov // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. № 6. P 399-411.

18. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // *Материаловедение*. 2016. № 9. С. 3-7.

Бреки Александр Джалюльевич, канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой МиОК, с.н.с. лаборатории ИЭС, albreki@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт проблем машиноведения РАН,

Семенов Сергей Александрович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, starikov_taii@mail.ru, Россия, Люберцы, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации,

Стариков Николай Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, starikov_taii@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гвоздев Александр Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Лаврушин Алексей Валентинович, адъюнкт, lavruchin.78@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное командное училище

**THE INFLUENCE OF MICROSCOPIC MUSHROOMS
OF ASPERGILLUS NIGER ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES
OF PLASTIC LUBRICANTS MATERIAL BRAND «LITA»**

A.D. Breki, S.A. Semenov, N.E. Starikov, A.E. Gvozdev, A.V. Lavrushin

*The paper presents the results of laboratory studies of the effect of branching mycelium of fungi of the *Aspergillus niger* species on the tribological properties of the plastic lubricant of the LITA brand. It is established that the plastic lubricant "LITA" is not mushroom-resistant. It is shown that in the case of *Aspergillus niger* in the lubricant environment, the stability of the friction process is deteriorating, which is expressed in an increase in the dispersion of the friction force values recorded in the experiment.*

*Key words: friction, wear, plastic lubricant, *Aspergillus niger*, lubrication layer, bio-deterioration, branching mycelium.*

Breki Alexander Dzhalyulyevich, candidate of technical science, docent, deputy department chair of MIOK, senior research associate of IES laboratory, albreki@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of problems of engineering science of RAS,

Semenov Sergey Aleksandrovich, doctor of technical sciences, senior researcher, starikov_taii@mail.ru, Russia, Lyubertsy, Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

Starikov Nikolay Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, starikov_taii@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gvozdev Aleksandr Evgen'yevich, doctor of technical science, professor, gvozdev.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Lavrushin Alexey Valentinovich, adjunct, lavruchin.78@mail.ru, Russia, Ryazan, Guards of the Ryazan higher airborne command school

УДК 539.4; 620.1; 621.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТА

**Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев,
А.Н. Чуканов, С.Н. Кутепов, О.В. Пантюхин**

В статье рассмотрено влияние легирующих элементов на чувствительность арматурных сталей к коррозионно-механическому разрушению и их механические характеристики. Установлено, что легирование термоупрочненного арматурного проката Mo, V и Ti приводит к мелкозернистой структуре с равномерно распределенными карбидами, стабилизирует субструктуру, замедляет диффузию водорода и тем самым снижает восприимчивость высокопрочных арматурных стержней к водородному растрескиванию.

Ключевые слова: легирование, арматурная сталь, коррозионное растрескивание под напряжением, водородное растрескивание.

Выпускаемая в настоящее время металлургической промышленностью стержневая арматура, термически упрочненная с прокатного нагрева из малоуглеродистых и низколегированных сталей, используемая при создании и возведении ответственных композиционных железобетонных конструкций, имеет высокий уровень физико-механических характеристик. Несмотря на это хрупкое разрушение напрягаемой стержневой арматуры остается серьезной научной проблемой, связанной в первую очередь с проникновением в сталь водорода при ее выплавке или в процессе нанесения защитных гальванических покрытий [1-3].

Одной из важнейших характеристик, определяющих чувствительность стали к коррозионно-механическому разрушению в водородсодержащих средах является ее химический состав [4], и особенно содержание углерода и легирующих элементов [5, 6]. Имеющаяся в научной литературе информация по влиянию легирующих элементов на сопротивление стали коррозионно-механическому разрушению не является систематической и относится главным образом к малоуглеродистым сталям [7, 8]. В этой связи представляется актуальным и целесообразным исследовать влияние легирования на механические свойства и чувствительность арматурных сталей к растрескиванию в водородсодержащих средах.

1. Материалы и методы исследования

Исследование влияния легирования (цирконием, алюминием, титаном, ниобием, бором, молибденом, ванадием) на механические свойства и чувствительность термоупрочненного арматурного проката (после высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) / электротермического упрочнения (ЭТУ)) к коррозионно-механическому разрушению проводили на опытных плавках сталей марок 20ГС, 20ГС2, 22ГСПМ, 35ГС. Механические свойства определяли по ГОСТ 12004-81 [9]. За среднее значение принимали результаты, полученные по испытаниям трех образцов. В качестве агрессивных сред, вызывающих наводороживание использовали: 1) при испытаниях, вызывающих коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) – кипящий раствор нитратов (60% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 5% NH_4NO_3 + 35% H_2O) при температуре 110 °С; 2) при испытаниях, вызывающих водородное растрескивание (ВР) водный раствор серной кислоты с добавлением роданистого аммония (4,5% H_2SO_4 + 2,5% NH_4CNS) с катодной поляризацией при плотности тока $D_K = 60 \text{ А/м}^2$.

Исследование стойкости к растрескиванию проводили на натуральных образцах стержневой арматуры Ø10 и 14 мм. Рабочая часть образца составляла 80...100 мм. Испытания проводили при напряжениях $\sigma_{\text{Э}} = (0,4...0,8)\sigma_{\text{В}}$. Стойкость стали против растрескивания оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 4-6 образцов на каждую точку графика.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Влияние легирования цирконием на стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением

Исследование влияния дополнительного легирования Zr на стойкость к КРН проводили на базе опытных плавки сталей 20ГС следующего химического состава: 0,23% С, 0,96% Мn, 0,59% Si, 0,030% S, 0,040% Р. Режимы обработки, механические и коррозионные свойства приведены в табл. 1.

При увеличении содержания Zr в интервале 0,084...0,50% наблюдали уменьшение пределов прочности и текучести, и вместе с тем рост пластических характеристик и отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{В}}$. После проведения ВТМО с

последующим самоотпуском при умеренных температурах стержневая арматура из стали 20ГС имеет повышенную чувствительность к КРН. Дополнительное легирование Zr, даже с 0,13%, в 3...5 раз увеличивает сопротивление разрушению при рабочих напряжениях $\sigma_{\text{Э}} = 640$ МПа. Наиболее существенно сопротивление разрушению увеличивается при добавлении 0,26% Zr и достигает максимума при содержании Zr на уровне 0,50%. На основании рекомендаций, приведенных в [10-11] такую арматуру можно считать стойкой к КРН.

Таблица 1

Механические и коррозионные свойства опытных плавок стали 20ГС (Ø10 мм) легированной Zr после ВТМО

№ п/п	Содержание циркония, %	Режим обработки	Механические свойства				Коррозионная стойкость	
			$\sigma_{\text{В}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\delta_{\text{Р}}$, %	$\sigma_{\text{Э}}$, МПа	Время до разрушения, час
1	0,084	ВТМО + закалка от 900 °С + самоотпуск при 400 °С	1120	910	12,0	2,0	640	8...10
2	0,13		1040	842	14,2	3,0	700 640 510	13...15 44...52 200*
3	0,26		1012	863	14,0	2,5	640	120
4	0,50		1002	830	14,0	3,2	800 640 510	24...30 200* 200*
5	–	ВТМО + закалка от 1050 °С + самоотпуск при 400...500 °С	1160	1082	12,5	3,0	800 640	8...10 16...20

*Образцы не разрушились после 200 час испытаний

2.2. Влияния легирования алюминием и титаном на стойкость против коррозионно-механического разрушения

Влияние алюминия на чувствительность стержневой арматуры к КРН и ВР исследовали на базе опытных плавок стали 35ГС. Химический состав, режимы обработки, механические и коррозионные свойства, а также результаты металлографического анализа приведены в табл. 2 - 4.

Авторами работы [12] установлено, что термическая обработка арматурных сталей вызывает повышение химической активности границ наследственных аустенитных зерен и, таким образом, способствует развитию КРН. Негативное влияние оказывает N в стали, поскольку разделение Fe_4N создает напряжения на границах зерен и углерод [5] на границах зерен, что способствует образованию дислокационных скоплений и их концентрации в полосах скольжения. По данным работы [12] Al сочетается со многими примесями в стали, в частности с N, образуя ста-

бильные соединения, которые фиксируют дислокации, освобождают границы зерен от некоторых вредных примесей и делают структуру более тонкой.

Таблица 2

Химический состав опытных плавок стали 35ГС легированной алюминием

№ плавки	Химический состав, %										
	C		Mn	Si	Ti	Al	N		O ₂	S	P
	C _{total}	C _{bound}					N _{total}	N _{bound}			
1	0,34	0,30	1,04	0,73	0,02	0,20	0,0054	0,0040	0,0063	0,023	0,008
2	0,34	0,313	1,04	0,77	0,02	0,32	0,0060	0,0056	0,0056	0,018	0,011
3	0,33	0,296	1,03	0,78	0,02	0,70	0,0062	0,0059	0,0053	0,017	0,012
4	0,34	–	1,40	0,80	0,01	0,01	0,0055	0,0041	0,0058	0,030	0,030

Примечание: C_{total}, N_{total} – общее содержание углерода и азота в стали соответственно; C_{bound}, N_{bound} – содержание углерода и азота в связанном состоянии на границах зерен.

Анализ экспериментальных результатов (табл. 3) показал, что при увеличении содержания Al в диапазоне 0,20...0,70%, количество N_{bound} увеличивается с 74% до 95% от общего количества в стали (см. табл. 2). Наряду с этим увеличение содержания Al способствует уменьшению размера аустенитных зерен (табл. 4).

Таблица 3

Механические и коррозионные свойства опытных плавок стали 35ГС (Ø14 мм) легированной Al после различных видов упрочнения

№ плавки	Режим обработки	Механические свойства			Стойкость к растрескиванию, час при $\sigma_3 = 0,75\sigma_B$
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	
1	ВТМО + закалка* от 870 °С + самоотпуск при 400 °С	1400	1200	6,4	11...16
	ЭТУ + закалка* от 920 °С + самоотпуск при 570 °С	1085	986	15,7	Свыше 400**
2	ВТМО + закалка* от 870 °С + самоотпуск при 400 °С	1440	1380	12,8	39...43
	ЭТУ + закалка* от 920 °С + самоотпуск при 570 °С	1080	895	17,2	Свыше 400**
3	ВТМО + закалка* от 870 °С + самоотпуск при 400 °С	1197	1102	15,0	Свыше 400**
4	ЭТУ + закалка* от 920 °С + самоотпуск при 400 °С	1260	1010	10,0	4...7

Примечание: *в конце прокатки; **Образцы не разрушились после 400 час испытаний

Добавление 0,20...0,32% Al мало влияет на прочность стали после ВТМО, но увеличивает условный предел текучести, относительное удлинение после разрыва и отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$. Увеличение концентрации Al до

0,7% приводит к снижению прочности и предела текучести и небольшому увеличению пластичности. Это объясняется наличием тонкодисперсных нитридов алюминия, которые могут уменьшить размер зерен после ВТМО при сравнительно низкой температуре в конце прокатки. Закалка стали с 0,20% Al от 870 °С после ВТМО приводит к появлению структуры тонкого игольчатого мартенсита и феррита, который отделен от аустенита, когда он охлаждается от низкой температуры ниже линии A_3 в системе Fe-C-Al, поскольку при добавлении Al линии A_1 и A_3 сдвигаются в сторону более высоких температур. Самоотпуск при 400 °С после ВТМО не приводит к заметному разложению мартенсита.

Таблица 4

Результаты металлографического анализа опытных плавок стали 35ГС легированной Al

№ плавки	Вид термической обработки	Размер аустенитных зерен после упрочнения		
		Число зерен на мм ² в выборке	Диаметр, м	
			максимальный	минимальный
1	ВТМО	11000	27	7
	ЭТУ	–	–	–
2	ВТМО	11000	29	5
	ЭТУ	–	–	–
3	ВТМО	11700	19	5
4	ЭТУ	8510	36	7

Металлографический анализ образцов показал, что коррозионные трещины в сталях, содержащих 0,20 и 0,32% Al, развиваются преимущественно вдоль границ наследственных аустенитных зерен; однако наряду с ними присутствуют участки с распространяющимися транскристаллитными трещинами.

Далее проводили исследование влияния комплексного легирования Al и Ti на механические и коррозионные свойства стали 35ГС. Химический состав, механические и коррозионные свойства приведены в табл. 5 и 6. Испытания проводили в среде, вызывающей водородное растрескивание (см. пункт 1, режим №2).

Введение Al и Ti приводит к уменьшению содержания N_2 и O_2 в стали за счет образования прочных химических соединений [7], а также способствуют измельчению исходных аустенитных зерен при разливке и последующей термомеханической обработке. Из анализа экспериментальных результатов следует, что наименьшую чувствительность к ВР имеет плавка №6 с максимальным содержанием Ti (0,72%) при содержании C и Al на нижнем пределе (0,31 и 0,01% соответственно).

Таблица 5
Химический состав опытных плавок стали 35ГС легированной Al и Ti

№ плавки	Химический состав, %								
	C	Mn	Si	Ti	Al	N ₂	O ₂	S	P
1	0,34	1,04	0,73	0,02	0,20	0,0054	0,0063	0,020	0,010
2	0,34	1,04	0,77	0,02	0,32	0,0060	0,0056	0,020	0,010
3	0,33	1,03	0,78	0,02	0,70	0,0062	0,0053	0,020	0,010
4	0,35	1,03	0,76	0,23	0,01	0,0074	0,0082	0,020	0,010
5	0,33	1,04	0,69	0,44	0,01	0,0080	0,0082	0,020	0,010
6	0,31	1,03	0,76	0,72	0,01	0,0074	0,0082	0,020	0,010

Таблица 6
Режимы термической обработки, механические и коррозионные свойства опытных плавок стали 35ГС (Ø14 мм) легированной Al и Ti

№ плавки	Режим обработки	Механические свойства			Время до разрушения, час при рабочих напряжениях ($\sigma_{\text{р}}$) МПа		
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	800	640	500
1	ВТМО + закалка от 870 °С + самоотпуск при 400 °С	1410	1200	7,0	2	2,83	5
2		1440	1380	12,0	1,6	2,17	5,23
3		1200	1100	15,0	2,33	4,5	6,67
4		1610	1450	7,0	1,67	2	4,17
5		1320	1170	11,0	5,17	5,22	15
6		1180	1100	15,0	20,75	23,17	150

2.3. Влияние химического состава на стойкость арматурных сталей к коррозионно-механическому разрушению

Исследовали влияние изменения химического состава (C, Mn, Si) в пределах марочного и комплексного легирования (Al, V, Mo, B и Zr) на чувствительность арматурных сталей марок 20ГС, 20ГС2, 22ГСРМ к коррозионно-механическому разрушению (КРН и ВР). Химический состав, механические и коррозионные свойства исследуемых опытных плавок приведен в табл. 7-9.

Таблица 7
Химический состав опытных плавок исследуемых сталей

№ плавки	Химический состав, %										
	C	Mn	Si	V	Al	Zr	Nb	B	Mo	S	P
20ГС2 (Ø10 мм – плавки №1-5; Ø14 мм – плавка №6)											
1	0,19	1,13	2,17	0,1	0,53	–	–	–	–	0,040	0,016
2	0,23	1,10	2,30	–	–	–	–	–	–	0,025	0,015
3	0,21	1,26	1,80	–	–	–	–	–	–	0,040	0,024

Окончание таблицы 7

№ плавки	Химический состав, %										
	C	Mn	Si	V	Al	Zr	Nb	B	Mo	S	P
20ГС2 (Ø10 мм – плавки №1-5; Ø14 мм – плавка №6)											
4	0,20	1,11	1,18	–	–	–	–	–	–	0,030	0,021
5	0,20	1,08	1,62	–	–	–	–	–	–	0,029	0,015
6	0,29	1,10	2,30	–	–	–	–	–	–	0,025	0,015
20ГС (Ø14 мм)											
7	0,23	0,96	0,59	–	–	0,13	–	–	–	0,030	0,040
8	0,23	0,93	0,57	–	–	0,23	–	–	–	0,030	0,040
9	0,23	0,94	0,56	–	–	–	0,10	–	–	0,030	0,040
10	0,24	0,93	0,55	–	–	–	0,17	–	–	0,030	0,040
11	0,23	0,90	0,47	–	–	–	0,30	–	–	0,030	0,040
12	0,24	0,95	0,47	–	–	–	–	0,0027	–	0,030	0,040
13	0,24	1,10	0,47	–	–	–	–	0,0030*	0,50**	0,030	0,040
14	0,21	1,60	1,40	–	–	–	–	–	–	0,030	0,040
22ГСРМ (Ø14 мм)											
15	0,20	1,10	0,80	–	–	–	–	0,0020	0,53	0,030	0,040
16	0,22	1,10	0,82	–	–	–	–	0,0035	0,52	0,030	0,040

Примечание: плавка № 13 – *легированная В; **легированная Мо

Таблица 8

Механические свойства исследуемых сталей

№ плавки	Режим обработки	Механические свойства		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
20ГС2 (Ø10 мм – плавки №1-5; Ø14 мм – плавка №6)				
1	ВТМО	1300	1140	14,6
2		1240	1100	15,0
3		1230	1090	14,7
4		1260	1120	14,5
5		1280	1130	15,2
6	ВТМО + закалка от 1050 °С + самоотпуск при 400 °С	1210	1094	14,0
20ГС (Ø14 мм)				
7	ВТМО	1120	910	12,0
8		990	840	14,0
		960	870	12,0
9		920	830	14,0
10		930	770	13,4
11		1300	940	7,3
12		1150	990	9,0
13		1440	1380	7,2
		1240*	1020*	10,0*
		1120*	840*	9,0*
		1030**	880**	11,0**
14		ВТМО + закалка от 1050 °С + самоотпуск в интервале 350...400 °С	970**	880**
14	ВТМО + закалка от 1050 °С + самоотпуск в интервале 350...400 °С	1420	1300	13,0
22ГСРМ (Ø14 мм)				
15	ВТМО + закалка в интервале 900...950 °С + самоотпуск при 450 °С	1030	884	15,0
16	ВТМО + закалка в интервале 900...950 °С + самоотпуск при 400 °С	1240	1020	12,0

Примечание: плавка № 13 – *легированная В; **легированная Мо

Изменение химического состава (С, Mn, Si) в пределах марочного незначительно изменяет чувствительность стали к ВР. Анализ экспериментальных результатов стойкости к ВР опытных плавок стали 20ГС2 (табл. 9) легированных 0,1% V и 0,53% Al показал, что при уровне растягивающих напряжений $\sigma_{\Sigma} = (0,5...0,8)\sigma_B$ легирование V способствует незначительному увеличению времени до разрушения, в то время как добавка Al вдвое уменьшает стойкость стали к ВР. При меньшем уровне растягивающих напряжений чувствительность стали 20ГС2 к ВР не менялась. Следует отметить, что сталь, легированная Al имела максимальное по сравнению с другими, содержание Mn (1,26%), S (0,040%) и P (0,024%), что могло сказаться на полученных результатах исследования.

Таблица 9

Стойкость исследуемых сталей к коррозионно-механическому разрушению

№ плавки	Стойкость против ВР (час) при рабочих напряжениях (σ_{Σ}) МПа							Стойкость против КРН (час) при рабочих напряжениях (σ_{Σ}) МПа		
	800	750	640	620	510	500	450	867	725	618
20ГС2 (Ø10 мм – плавки №1-5; Ø14 мм – плавка №6)										
1	0,87	–	1,43	–	–	1,60	–	–	–	–
2	0,95	–	2,13	–	–	2,23	–	–	–	–
3	0,50	–	0,83	–	–	0,33	–	–	–	–
4	2,0	–	2,40	–	–	2,67	–	–	–	–
5	1,50	–	2,17	–	–	2,83	–	–	–	–
6	–	2,50	–	2,0	4,0	–	–	–	12,0	–
20ГС (Ø14 мм)										
7	3,08	–	2,33	–	4,58	–	3,50	–	–	–
	1,08		1,33		2,58		3,0			
8	3,08	–	3,83	–	2,0	–	3,75	–	–	–
	1,50		1,67		2,67		8,0			
9	2,67	–	3,08	–	10,0	–	20,0	–	–	–
10	1,25	–	1,50	–	2,0	–	2,83	–	–	–
11	2,33	–	1,75	–	5,50	–	7,67	–	–	–
12	0,50	–	1,08	–	1,75	–	2,33	–	–	–
13	16*	–	94,0*	–	36,0*	–	148*	–	–	–
	3,17*		3,0*		3,33*		4,38*			
	30,0**		108**		66,5**		150**			
	11,0**		1,07**		1,0**		2,0**			
14	–	5,5	–	12,0	14	–	–	4,0	5,0	5,5
22ГСРМ (Ø14 мм)										
15	–	108	–	66,5	–	–	–	–	200	200
16	–	94	–	18	148	–	–	215	250	–

Примечание: плавка № 13 – *легированная В; **легированная Мо

Далее проводили исследование влияния легирования Zr, Nb, В, Мо а также комплексного легирования В и Мо на механические и коррозионные свойства опытных плавок сталей марок 20ГС, 20ГС2, 22ГСРМ. Различные механические свойства у плавок с одинаковым химическим соста-

вом были получены за счет изменения режимов ВТМО. Легирование В в количестве 0,0027% позволяет после ВТМО получить сталь повышенной прочности, обладающую при этом повышенной чувствительностью к ВР.

Анализ экспериментальных результатов (табл. 9) влияния легирования Zr и Nb на коррозионную стойкость стали 20ГС показал, что введение в сталь Zr и Nb в количестве 0,13...0,23% и 0,1...0,3% соответственно способствует незначительному снижению чувствительности стержневой арматуры к ВР. Некоторое (примерно вдвое) повышение сопротивляемости плавки №9 ВР объясняется, очевидно, меньшей прочностью указанной плавки и более высоким значением пластичности ($\delta_5 = 13,4\%$ против 7...9% у других).

Легирование В в количестве в количестве 0,0030% также практически не влияло на чувствительность стали к ВР, а Мо в количестве 0,50% обеспечило стали 20ГС (плавка №13) высокие значения механических и коррозионных свойств.

Комплексное легирование В (0,52...0,53%) и Мо (0,0020 и 0,0035%) обеспечивает арматуре из стали 22ГСРМ хорошую прокаливаемость при ВТМО, прочность и низкую чувствительность к коррозионно-механическому разрушению.

Выводы

1. Установлено, что низкую чувствительность к коррозионно-механическому разрушению стержневой арматуры, изготовленной из стали 35ГС, обеспечивает следующий химический состав: 1) при КРН – 0,28...0,34% С, 0,8...1,2% Mn, 0,6...0,9% Si, и 0,2...0,6% Al; 2) при ВР – 0,31% С, 1,03% Mn, 0,76% Si, 0,01% Al и 0,72% Ti. При этом сталь 35ГС должна прокатываться при обычных условиях прокатки, но с принудительным ограничением температуры конца прокатки после ВТМО или закалкой (870-920 °С). Оптимальная температура самоотпуска зависит от количества Al.

2. Для стали 20ГС подвергнутой легированию Zr в количестве 0,0084...0,50% сопротивление КРН достигает максимума при содержании Zr на уровне 0,50%.

3. Исследование комплексного легирования сталей 20ГС, 20ГС2, 22ГСРМ показало, что наибольшую сопротивляемость коррозионно-механическому разрушению показывает сталь 22ГСРМ легированная В (0,52...0,53%) и Мо (0,0020 и 0,0035%).

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [13-45].

Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Сергеев Н.Н. Водородное охрупчивание и растрескивание высокопрочной арматурной стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Сергеев Николай Николаевич. Тула, 1975. 27 с.

2. Влияние водорода на пластические свойства арматурного проката / Е.П. Барадынцева, Н.А. Глазунова, С.В. Стефанович, О.В. Роговцова // *Литье и металлургия*. 2013. № 3S (72). С. 179-183.

3. Wanhill R.G.H., Barter S.A., Lynch S.P., Gerrard D.R. Chapter 20: Prevention of hydrogen embrittlement in high strength steels, with emphasis on reconditioned aircraft components // *Corrosion Fatigue and Environmentally Assisted Cracking in Aging Military Vehicles*. RTO-AG-AVT-140, Research and Technology Organisation of NATO, March, 2011. P. 20-1-20-52.

4. Крутикова И.А. Панфилова Л.М., Смирнов Л.А. Анализ влияния различных факторов на замедленное разрушение крепежных соединений конструкций // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. 2012. № 2. С. 68-74.

5. Извольский В.В., Сергеев Н.Н. О влиянии хрома и углерода на комплекс физико-механических свойств и склонность к коррозионному растрескиванию стали 23Х2Г2Т // *Известия Тульского государственного университета. Серия Физика*. 1998. Вып. 1. С. 137-141.

6. Хонелидзе Д.М., Гвоздев А.Е., Сергеев А.Н., Чуканов А.Н. Влияние химического состава стержневой арматуры на сопротивление водородной стресс-коррозии // VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 7-10 ноября 2017 г. / *Сборник материалов*. М.: ИМЕТ РАН, 2017. С. 746-748.

7. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. М.: Металлургия, 1974. 256 с.

8. Потак Я.М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 208 с.

9. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями № 1, 2). М.: Стандартинформ, 2009. 22 с.

10. ГОСТ 9.901.1-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание. М.: Издательство стандартов, 1993. 21 с.

11. ГОСТ 9.901.4-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов при одноосном растяжении. М.: Издательство стандартов, 1993. 7 с.

12. Влияние легирования алюминием на стойкость против коррозионного растрескивания термически упрочненной стержневой арматуры / М.А. Криштал, Б.А. Гусев, Л.Е. Эпштейн, С.Н. Алексеев. // *Физико-химическая механика материалов*. 1974. Ч. 10. Вып. 1. С. 108-109.

13. Gvozdev A.E. Effect of the stress state on superplasticity of hard-to-deform high-speed powder steel // *Металлы*. 1994. № 4. P. 127-131.

14. Расчет кластерной структуры расплава, ее влияние на образование наноаморфных твердых фаз и их структурную релаксацию при последующем нагреве / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, А.В. Афанаскин, Е.А. Гвоздев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. № 6. С. 12-16.

15. Влияние разнотерности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // *Материаловедение*. 2014. № 7. С. 23-26.

16. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels / А.Е. Gvozdev, I.V. Minaev, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 1. Р. 41-44.

17. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation // А.Е. Gvozdev, D.N. Bogolyubova, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 1. Р. 32-40.

18. Role of nucleation in the of first-order phase transformations / А.Е. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 4. Р. 283-288.

19. Комплексные задачи теории пластичности: монография / Н.Д. Тутьшкин, А.Е. Гвоздев, В.И. Трегубов, Ю.В. Полтавец, Е.М. Селедкин, А.С. Пустовгар, В.И. Золотухин, Г.М. Журавлев, В.И. Золотухин; 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 408 с.

20. Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев // *Технология металлов*. 2016. № 1. С. 23-32.

21. Синтез и триботехнические свойства композиционного покрытия с матрицей из полиимида (Р-ООО)ФТ и наполнителем из наночастиц дисульфида вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков, Ю.А. Фадин // *Материаловедение*. 2016. № 4. С. 44-48.

22. Ресурсы деформационной способности различных материалов: учебное пособие / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, А.А. Калинин, С.Е. Александров, Н.Е. Стариков, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, С.Н. Кутепов, Е.В. Цой, Д.С. Клементьев, Е.Б. Соломатникова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 172 с.

23. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.

24. О состоянии превращения металлов и сплавов: монография / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 245 с.

25. Особенности структурных и фазовых превращений в титановых заготовках в процессе высокоскоростного пластического деформирования: монография / Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, А.Д. Бреки, В.В. Медведева, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий.; под ред. Н.А. Крылова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 202 с.

26. Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния, для узлов трения управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 166 с.

27. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

28. Сопряженные поля в упругих, пластических, сыпучих средах и металлических труднодеформируемых системах: монография / Э.С. Макаров, В.Э. Ульченкова, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 526 с.

29. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 32-47.

30. Анализ теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания металлов и сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 3(72). С. 6-33.

31. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

32. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92.

33. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95.

34. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

35. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // *Сталь*. 2017. № 6. С. 26-39.

36. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

37. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 32-36.

38. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 56-59.

39. Maximum plastic strengthening in tool steels / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, A.E. Cheglov, N.N. Sergeev, O.M. Gubanov // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. № 6. P 399-411.

40. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // *Материаловедение*. 2017. № 7. С. 11-22.

41. Новые конструкционные материалы: учебное пособие / Н.Е. Стариков, В.К. Зеленко, О.В. Кузовлева, А.Н. Сергеев, В.Ю. Кузовлев, А.А. Калинин, А.В. Маляров; под. общ. ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 296 с.

42. *Материаловедение: учебник для вузов* / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев., В.К. Зеленко, А.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е доп. и испр. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 469 с.

43. *Технология металлов и сплавов: учебник* / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, О.В. Кузовлева, Г.М. Журавлёв, Д.А. Провоторов.; Под ред. проф. Н.Н. Сергеева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 490 с.

44. Патент на полезную модель 2016122692/28 (166249) Образец для определения когезионной прочности газотермических порошковых покрытий / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе,

И.В. Тихонова, А.Д. Бреки, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, А.А. Калинин, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, М.В. Ушаков; заявитель и патентообладатель Гвоздев Александр Евгеньевич. № 2016122692/28 заявл. 08.06.16; опубл. 20.11.16, Бюл. № 32.

45. Патент на полезную модель 2016142134 (170385) Образец для определения адгезионной прочности покрытий / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, И.В. Тихонова, А.Д. Бреки, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, А.А. Калинин, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.И. Кузнецова, А.В. Казакова, Д.Н. Романенко, Е.Ф. Романенко, В.Э. Лисицина; заявитель и патентообладатель Гвоздев Александр Евгеньевич. № 2016142134 (17385) заявл. 26.10.16; опубл. 24.04.17, Бюл. № 12. 6 с.

Сергеев Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, technology@tspu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Сергеев Александр Николаевич, д-р пед. наук, профессор, ansergueev@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Гвоздев Александр Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, gwozdew.alexandr2013@yandex.ru Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Чуканов Александр Николаевич, д-р техн. наук, доцент, alexchukanov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Кутепов Сергей Николаевич, канд. пед. наук., kutepov.sergei@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Пантюхин Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, olegpantjukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ALLOYING ON MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES OF THE REINFORCEMENT ROLLER

N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.N. Chukanov, S.N. Kutepov, O.V. Pantjuhin

The article considers the influence of alloying elements on the sensitivity of reinforcing steels to corrosion-mechanical destruction and their mechanical characteristics. It was found that alloying of thermo-strengthened rebar steel Mo, Bo and Ti leads to a fine-grained structure with finely distributed carbides, stabilizes the substructure, slows down the diffusion of hydrogen and thereby reduces the susceptibility of high-strength rebar to hydrogen cracking.

Key words: alloying, reinforcing steel, stress corrosion cracking, hydrogen cracking.

Sergeev Nikolay Nikolaevich, doctor of technical science, professor, techno-logy@tspu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Sergeev Aleksandr Nikolaevich, doctor of pedagogical science, professor, ansergueev@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Gvozdev Aleksandr Evgen'yevich, doctor of technical science, professor, gwozdev.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Chukanov Aleksandr Nikolaevich, doctor of engineering science, associate professor, alexchukanov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Kutepov Sergey Nikolaevich, candidate of pedagogical science, kutepov.sergei@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Pantjuhin Oleg Viktorovich, candidate of technical science, docent, olegpantjuhin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.83

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО РАДИУСА КРИВИЗНЫ АРКИ ЗУБА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОЛЕСА С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЕГО ЗУБООБРАБОТКЕ

А.А. Маликов, А.В. Сидоркин, С.Л. Рахметов

Разработана математическая модель для определения минимально возможного радиуса кривизны арки зуба цилиндрического колеса. Проанализирован механизм влияния изменения габаритного радиуса обрабатываемой заготовки на радиус кривизны арки ее зуба.

Ключевые слова: шевингование-прикатывание, круговые зубья, зубчатые колеса, инструмент, режцовая головка, радиус кривизны.

Как известно в передачах, оснащенных цилиндрическими колесами с круговыми зубьями (ЦККЗ) уменьшение радиуса кривизны арки зуба способствует повышению их технических и эксплуатационных характеристик. Поэтому формообразование зубьев ЦККЗ с минимальным радиусом кривизны арок является актуальной задачей. Классический случай прорезания впадины зуборезными режцовыми головками описан в [1], где предложено два метода определения минимального производящего радиуса режцовых головок. Один из которых подробно рассмотрен в [1] и снабжен математическим описанием. Суть его заключается в том, что после обработки впадины заготовки, деление на один зуб осуществляться без отвода

резцовой головки, т.е. радиуса внутренних режущих кромок зубьев достаточно для выполнения этой операции без подрезаний. В работе [1] также предлагается математическое описание для осуществления расчетов по другому методу, отличающемуся от рассмотренного выше тем, что минимальный радиус зубьев головки ограничивается из-за появления опасности подрезания зубьев заготовки в момент окончания процесса профилирования, зубьями резцовой головки, противоположными от обрабатываемой впадины, причем деление осуществляется после отвода режущего инструмента (рис. 1).

Минимальный диаметр односторонней резцовой головки определяется по схеме, описанной в [1], когда цикл обработки содержит: рабочий ход – обработка впадины; отвод инструмента от обрабатываемого колеса; отвод обрабатываемого колеса в исходное положение; деление.

Для упрощения расчетов, радиуса скруглений на зубьях резцовой головки, учитываться не будут. В соответствии с рис. 1 зададимся минимальной шириной зуба резцовой головки на ее вершине – $S_{B\min}$. Тогда, минимальный радиус резцовой головки $r_{0\text{вi min}}$ для обработки вогнутой стороны зуба обрабатываемой заготовки ЦККЗ, а также комбинированного инструмента – шевера-прикатника, конструкция которого подробно рассмотрена в работах [2 – 6], в момент окончания профилирования, определится по следующей зависимости:

$$r_{0\text{вi min}} = \frac{c_1^2}{2c_2},$$

где c_1 – расстояние, определяемое между точкой, расположенной на выпуклой стороны зуба шевера-прикатника в осевой плоскости, и точкой, расположенной на окружности вершин r_{a0} шевера-прикатника в торцовой плоскости в месте, где проходят зубья резцовой головки, противоположном от обрабатываемой впадины; c_2 – проекция c_1 в осевую плоскость шевера-прикатника.

Расстояние c_1 определяется по следующей зависимости:

$$c_1 = \sqrt{b_0^2 + c_2^2},$$

где b_0 – ширина шевера-прикатника. Расстояние c_2 определяется по следующей зависимости:

$$c_2 = a_1 + a_2 + a_4,$$

где a_1 – расстояние от оси симметрии шевера-прикатника до точки, расположенной в месте, где проходят зубья резцовой головки, противоположном от обрабатываемой впадины; a_2 – расстояние от этой же оси до точки, расположенной на окружности вершин r_{a0} , и принадлежащей эвольвентной поверхности зуба шевера-прикатника в момент окончательного про-

филирования вогнутой стороны; a_4 – расстояние от точки, находящейся на вершине зуба резцовой головки до точки, расположенной на окружности вершин r_{a0} , и принадлежащей эвольвентной поверхности зуба шевера-прикатника в момент окончательного профилирования этой же стороны. Расстояние a_1 определяется по следующей зависимости:

$$a_1 = \frac{r_{f0} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_1\right)}{\sin \beta_1},$$

где β_1 – угол, определяющий положение точки, расположенной в месте, где проходят зубья резцовой головки, противоположном от обрабатываемой впадины, рассчитывается по зависимости:

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{r_{f0} \cdot \sin \frac{\pi}{2}}{r_{a0}}\right).$$

Расстояние a_2 определяется по следующей зависимости:

$$a_2 = r_{a0} \cdot \sin \alpha_1,$$

где α_1 – угол поворота шевера-прикатника в момент окончательного профилирования вогнутой стороны зуба, определяется по зависимости:

$$\alpha_1 = v_{a0} - \alpha_{0e} - \operatorname{inv} \alpha_{a0},$$

где v_{a0} – угол развернутости между радиусом, проведенным в предельную точку, и радиусом, проведенным в центр кривизны эвольвенты на окружности вершин r_{a0} [7]; α_{0e} – угол рабочей стороны наружного резца резцовой головки [8]; $\operatorname{inv} \alpha_{a0}$ – угол между радиусами, проведенными в предельную и в рассматриваемую точки эвольвенты [1]. Угол развернутости определяется по следующей зависимости:

$$v_{a0} = \frac{r_{a0} \cdot \sin \alpha_{a0}}{r_{b0}},$$

где α_{a0} – угол между касательной к профилю в рассматриваемой точке и радиус-вектором этой точки [6], рассчитывается по зависимости:

$$\alpha_{a0} = \arccos\left(\frac{r_{b0}}{r_{a0}}\right).$$

Инвалюта угла α_{a0} определяется по следующей зависимости:

$$\operatorname{inv} \alpha_{a0} = v_{a0} - \operatorname{arctg} v_{a0}.$$

Расстояние a_4 определяется по следующей зависимости:

$$a_4 = a_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{0e}.$$

Расстояние a_3 определяется по следующей зависимости:

$$a_3 = r_{a0} \cdot \cos \alpha_1 - r_{f0},$$

где a_3 – расстояние между касательной, проведенной к окружности r_{f0} и параллельной ей линией, проходящей через точку, расположенную на окружности вершин r_{a0} , и принадлежащую эвольвентной поверхности зуба шевера-прикатника в момент окончательного профилирования вогнутой стороны.

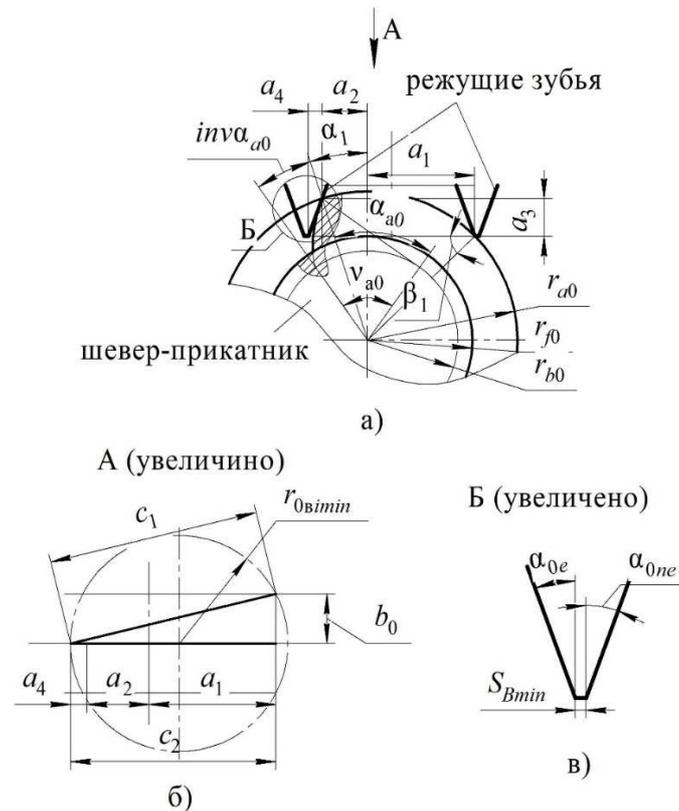


Рис. 1. Схема к определению минимального радиуса резцовой головки для формообразования вогнутой стороны зуба шевера-прикатника:
***a* – торцовая плоскость шевера-прикатника;**
***б* – вид со стороны торцовой плоскости резцовой головки;**
***в* – зуб резцовой головки**

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет реализовать метод с отводом резцовой головки, рассмотренный в [1], и осуществить определение диаметра резцовой головки, позволяющей получать зубья с меньшим радиусом кривизны арки, по сравнению с методом без отвода резцовой головки.

Можно сказать, что увеличение радиуса шевера-прикатника r_{a0} влияет на минимальный радиус кривизны арки зуба обрабатываемой заготовки r_{0emin} в соответствии со степенной зависимостью, форма которой, для рассматриваемого примера стремится к линейной, что наглядно иллюстрирует график, представленный на рис. 2.

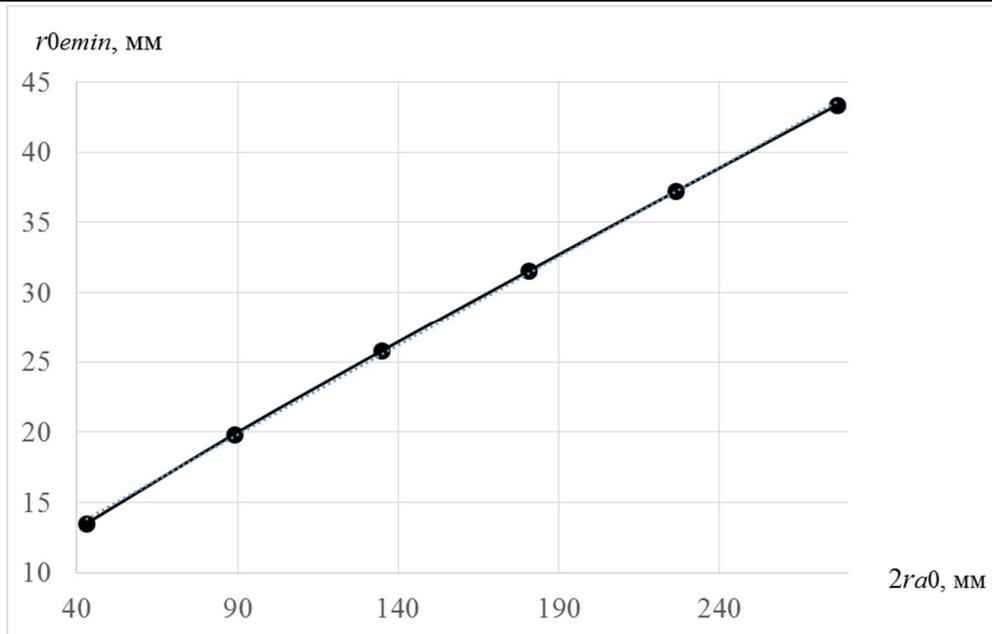


Рис. 2. Зависимость минимального радиуса кривизны арки зуба шевера-прикатника r_{0emin} от его диаметра $2r_{a0}$

Из графика видно, что увеличение диаметра $2r_{a0}$ шевера-прикатника оказывает значительное влияние на минимальный радиус r_{0emin} резцовых головок.

Список литературы

1. Коганов И.А. Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. Тула: Приокское книжное издательство, 1970. 184 с.
2. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Технология обработки круговых зубьев шеверов-прикатников на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. 2011. №6. С. 15-20.
3. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Инновационные технологии обработки зубьев цилиндрических колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 335 с.
4. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Технологические особенности изготовления шевера-прикатника для обработки цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 1. С. 179-186.
5. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Методы нарезания арочных зубьев комбинированного инструмента для обработки цилиндрических зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2008. Вып. 3. С. 129-134.

6. Сидоркин А.В. К вопросу об обеспечения размерного контроля шеверов-прикатников для обработки цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. Вып. 2. Ч. 2. С. 180-185.

7. Болотовский И.А., Гурьев Б.И., Смирнов В.Э., Шендерей Б.И. Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи внешнего зацепления. М.: Машиностроение. 1974. 160 с.

8. ГОСТ 11902-77. Головки зуборезные для конических и гипоидных зубчатых колес с круговыми зубьями. Основные размеры. Введ. 1979-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1985. 10 с.

Маликов Андрей Андреевич, д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой, andrej-malikov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сидоркин Андрей Викторович, канд. техн. наук, доцент, alan-a@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Рахметов Станислав Львович, аспирант, rakhmetov_s@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

*TO A RESOLUTION OF DETERMINATION OF THE MINIMUM
RADIUS OF THE CYLINDRICAL GEAR TORQUE CURVATURE
CURVATURE, IN ACCORDANCE WITH TECHNOLOGICAL LIMITATIONS
ARISING IN TOOTH-PROCESSING*

A. A. Malikov, A.V. Sidorkin, S. L. Rakhmetov

A mathematical model for determining the minimum possible radius of curvature of the arch of a tooth of a cylindrical gear is developed. The mechanism of the influence of the change in the overall radius of the workpiece being processed on the radius of curvature of the arch of its tooth is analyzed.

Key words: shav-rolling, circular teeth, cogwheels, tools, incisor head, radius of curvature.

Malikov Andrey Andreevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, andrej-malikov@yandex.ru, Russia, Tula State University,

Sidorkin Andrey Victrovich, candidate of technical science, docent, alan-a@mail.ru, Russia, Tula State University,

Rakhmetov Stanislav Lvovich, postgraduate, rakhmetov_s@mail.ru, Russia, Tula State University

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИГОДНОСТИ МОТОРНОГО МАСЛА М-8ДМ В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ Д-245.7ЕЗ АВТОМОБИЛЯ ГАЗ-3309 НА ЦИКЛЫ ЕГО ПОСТАВКИ В ГРАНИЦАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

К.М. Чечулин, А.Д. Бреки, И.Е. Молоков, А.Е. Гвоздев, С.Н. Кутепов,
О.В. Пантюхин

В работе приведены результаты лабораторных исследований проб моторного масла М-8ДМ на разных этапах эксплуатации двигателя внутреннего сгорания Д-245.7ЕЗ автомобиля ГАЗ-3309. Показаны изменения в процессе эксплуатации таких диагностических показателей как диэлектрическая проницаемость, щелочное число, вязкость, степень окисления, сульфирования и нитрирования, а также содержание воды, гликоля и сажи. Посредством расчётов с использованием экспериментальных данных получены зависимости пригодности масла М-8ДМ по различным диагностическим параметрам от числа оборотов коленчатого вала. Показана возможность прогнозирования замены смазочного масла М-8ДМ посредством анализа зависимостей его пригодности по различным показателям. Установлена взаимосвязь между анализом пригодности смазочного масла М-8ДМ и циклами его поставки в границах технического обеспечения.

Ключевые слова: техническое обеспечение, диагностика, моторное масло, наработка, старение масел, ГАЗ-3309, пригодность, цикл поставки.

При работе двигателя внутреннего сгорания моторное масло постепенно существенно изменяет свой химический состав и свойства. Двигатель можно рассматривать как сложный реактор, в котором масло преобразуется и происходит его «старение». Старение происходит за счет загрязнения масла атмосферной пылью, продуктами износа, газообразными, жидкими и твердыми веществами, образующимися в результате химических и физико-химических изменений углеводородов базового масла и компонентов присадок [4, 5, 6]. В результате этого в нем образуются различные отложения в элементах системы циркуляции моторного масла. Загрязняющие примеси органического и неорганического состава, накапливающиеся в масле, изменяют характер трения и износа, засоряют масляные каналы, фильтры, образуются отложения в картере двигателя [1]. В связи с этим, обеспечение надежной работы двигателя путем диагностического контроля и своевременного выявления существенных изменений моторного масла весьма эффективно для увеличения долговечности с одной стороны, а с другой для повышения качества и системности технического обеспечения машин различных организаций маслами определённого химического состава. Диагностика состояния моторных масел в организациях, содержащих парк машин, позволяет правильно и эффективно определить цикличность поставки данных масел в границах технического обеспечения.

Материалы и методы исследования

Определение состояния моторного масла осуществляется посредством использования различных методов оценки физико-химических свойств по плотности, цвету и загрязнению масел. При этом оцениваются следующие основные показатели: вязкость, щелочное число, окисление, а также наличие загрязнений. Также, известны методы определения смазывающих свойств, проявляющихся в способности масла подавлять изнашивание и задиры, снижать трение, соответствующие требованиям ГОСТ 9490-75, ASTM D 2266 и других стандартов [2].

Также, как и двигатель, моторное масло обладает ресурсом, поэтому оно влияет вкупе с другими элементами на коэффициент технической готовности различной техники, в том числе и военного назначения.

Диагностику состояния масла и оценку его пригодности, в границах данной работы осуществляли посредством использования следующих современных приборов:

- Прибор марки OA-5000 (рис. 1);
- Вискозиметр SpectroVisc Q3000 (рис. 2);
- ИК-анализатор Q1100 (рис. 3).



Рис. 1. Прибор OA-5000

Использование портативного прибора марки OA-5000 позволяет определять техническое состояние работающего масла (его пробы на определенном этапе эксплуатации) методом тлеющего разряда.



Рис. 2. Вискозиметр SpectroVisc Q3000

Вискозиметр SpectroVisc Q3000 предназначен для измерения кинематической вязкости в условиях эксплуатации. Он не требует растворителей, проверки плотности моторного масла и наличия термометра. Данный прибор используется в производственных (полевых) и лабораторных условиях при температурах окружающей среды в диапазоне от 0 до +40 °С.



Рис. 3. ИК-анализатор Q1100

Характеристики прибора «ИК-анализатор Q1100» обеспечивают возможность получения основных параметров состояния как синтетических, так и минеральных моторных масел с использованием инфракрасной спектроскопии.

Результаты и их обсуждение

В границах данной работы приведены результаты исследований проб моторного масла М-8ДМ взятых в процессе его натуральных испытаний в двигателе внутреннего сгорания Д-245.7ЕЗ автомобиля ГАЗ-3309 с пробегом. В автомобиль ГАЗ-3309 заливалось чистое масло М-8ДМ, которое после реализации определённого числа миллионов оборотов коленчатого вала (КВ) собиралось в виде небольших проб и анализировалось с использованием описанных выше приборов (рис. 1-3). В процессе анализа определялись такие параметры как диэлектрическая проницаемость, щелочное число (ОЩЧ), вязкость, степень окисления, сульфирования и нитрирования, а также содержание воды, гликоля и сажи.

Значения диагностического параметра – диэлектрической проницаемости при различном числе оборотов КВ двигателя Д-245.7ЕЗ, полученные электрофизическим методом (рис. 1) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения диагностического параметра – диэлектрической проницаемости при различном числе оборотов КВ двигателя Д-245.7ЕЗ

Электрофизический метод контроля работающего моторного масла	Исходный показатель	Предельный показатель	6,624	9,792	14,112
Диэлектрическая проницаемость	1	60	16,4	15,6	18,1

Из табл. 1 следует, что диэлектрическая проницаемость в диапазоне от 0 до 14,112 миллионов оборотов коленчатого вала остаётся в пределах нормы.

Значения диагностических параметров для моторного масла М-8ДМ при различном числе оборотов КВ двигателя Д-245.7ЕЗ, при измерении изменений физических и химических свойств с использованием приборов (рис. 2-3) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения диагностических параметров для моторного масла М-8ДМ при различном числе оборотов КВ двигателя Д-245.7ЕЗ

Количество оборотов коленчатого вала, млн.об	Исходный показатель	Предельный показатель	6,624	9,792	14,112
Основные параметры оценки пригодности					
Кинематическая вязкость при 40 °С, сСт	98,2	снижение 20%	91	85,1	73,4
Обще-щелочное число, mg КОН	7,7	не ниже 1,0	7,1	5,6	0,2
Основные показатели, описывающие процесс старения масла					
Нитрование, abs/см	0,1	30	42,4	49	52
Окисление, abs/0,1	2,3	30	18,8	20,4	27,8
Сульфирование, abs/0,1	15,1	30	22,4	24,5	34,9
Основные показатели загрязненности масла					
Содержание сажи, %	0,01	3	0,35	0,4	0,46
Содержание гликоля, %	0	3	0,18	0,2	0,25
Содержание воды, ppm	95	3000	326	443	699

Из таблицы 2 следует, что не все диагностические параметры в диапазоне от 0 до 14,112 миллионов оборотов коленчатого вала остаются в пределах нормы. При этом такой важный показатель как вязкость уменьшился более 20%. Зависимость изменения вязкости от числа миллионов оборотов двигателя Д-245.7ЕЗ показана на рис. 4.

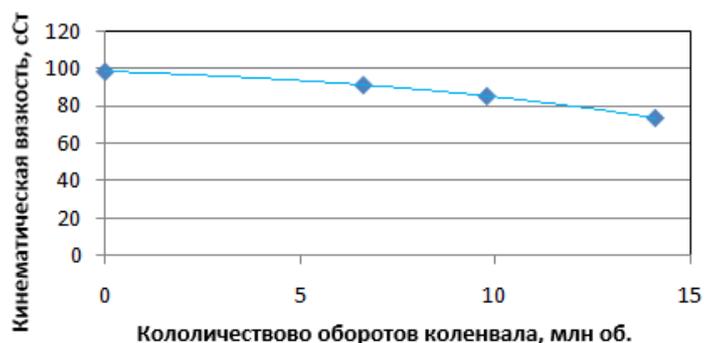


Рис. 4. Зависимость кинематической вязкости от количества оборотов коленчатого вала двигателя Д-245.7ЕЗ

Снижение вязкости моторного масла ниже 20% говорит о необходимости его замены, а у других диагностических параметров существуют свои предельные значения, определённые соответствующими приборами. В связи с этим целесообразно ввести оценочную функцию, позволяющую давать ориентировочные прогнозы относительно изменения того или иного параметра до предельного значения.

В работе [3] указано, что работающее в двигателе масло пригодно к использованию или обладает пригодностью, величина которой по определяемым показателям состояния равна:

$$P_i = \frac{x_i - x}{x_0 - x}, \quad (1)$$

где P_i – пригодность масла в момент времени t_i по одному из показателей; x_0 – начальное значение показателя (в момент времени 0); x_i – текущее значение показателя (в момент времени t_i); x – предельное значение.

В границах данной работы, мы уточнили формулу (1) и представили её в виде зависимости пригодности масла от числа оборотов коленчатого вала двигателя и вида показателя оценки состояния масла (вида диагностического параметра):

$$P_p(n) = \frac{p(n) - p_{\max}}{p_0 - p_{\max}} \times 100\%, \quad (2)$$

где P_p – пригодность масла по диагностическому параметру (p); $p(n)$ – зависимость диагностического параметра от числа оборотов коленчатого вала, полученная в результате аппроксимации экспериментальных точек.

Остальные параметры в (2) интерпретируются аналогично (1). Например, зависимость кинематической вязкости моторного масла М-8ДМ от числа оборотов КВ на основе данных таблицы 2 аналитически выражается функцией:

$$v = -0,0024n^3 - 0,0399n^2 - 0,7177n + 98,2, \quad (3)$$

где v – кинематическая вязкость масла; n – число оборотов коленчатого вала двигателя Д-245.7ЕЗ. Подставляя (3) и данные таблицы 2 в формулу (2) получим зависимость пригодности масла по вязкости от числа оборотов КВ:

$$P_v(n) = \left(\frac{(-0,0024n^3 - 0,0399n^2 - 0,07177n + 98,2) - 78,6}{98,2 - 78,6} \right) \times 100\%. \quad (4)$$

От вязкости масла зависит величина энергетических потерь на трение в двигателе, несущей способности смазочного слоя, связанного с ней износа пар трения и соответственно объем мероприятий очередного технического обслуживания. На основе аппроксимации данных табл. 1 и 2, для других диагностических параметров получили зависимости пригодности, аналогичные зависимости по вязкости (4). Графики полученных зависимостей приведены на рис. 5.

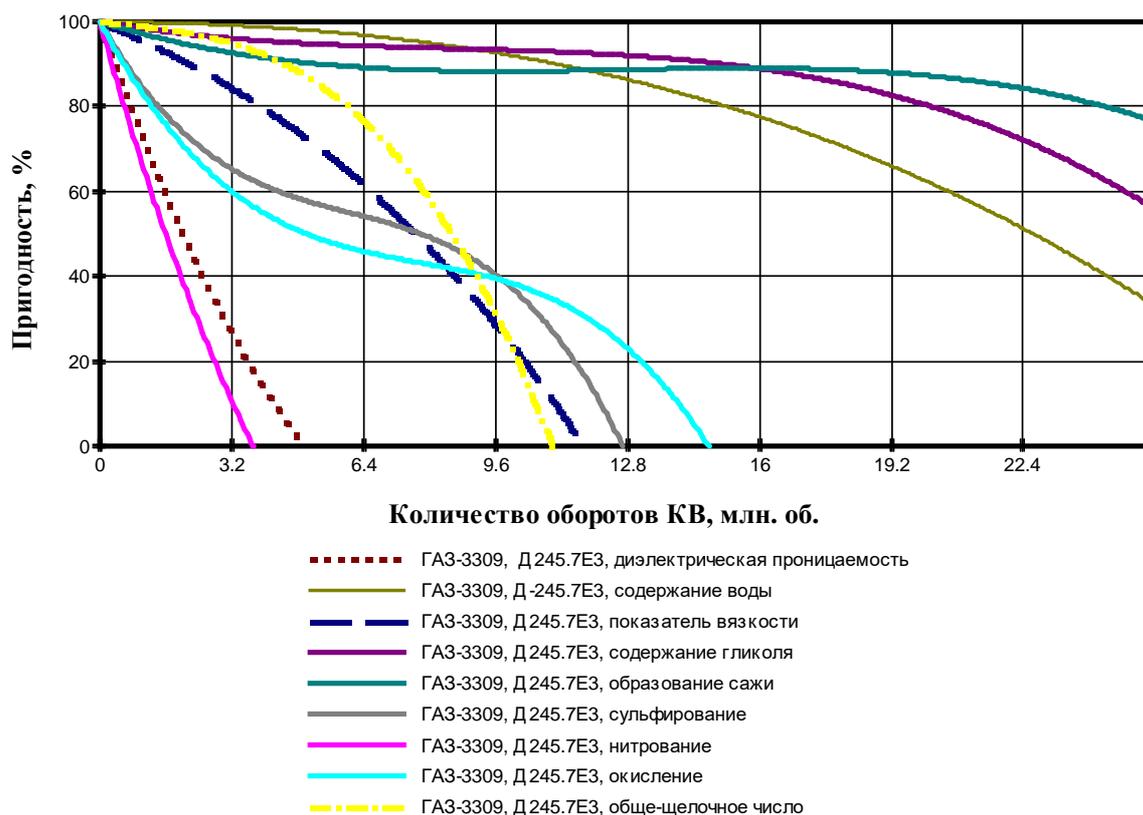


Рис. 5. Графики зависимости пригодности моторного масла М-8ДМ по различным показателям от количества оборотов коленчатого вала

Из рисунка 5 видно, что зависимости типа (4) позволяют давать ориентировочные прогнозы либо по замене смазочного масла, либо по совершению определённых действий над ним с целью частичного восстановления его исходных свойств. Лимитирующим показателем в границах данного исследования является нитрование, поэтому уже после 4млн.об. необходимо принимать меры по его снижению и повышению диэлектрической проницаемости. Системным показателем является вязкость. Например, для определения числа оборотов КВ при котором требуется замена масла по критическому значению кинематической вязкости, необходимо приравнять правую часть формулы (4) к нулю и найти из кубического уравнения его действительный корень $n = n_{np}$ (предельное число оборотов, которое по прогнозу должен совершить КВ до замены масла). В границах данного исследования двигатель проработал около 3 млн. об. при недопустимой вязкости масла.

Среднестатистическое значение $\langle n_{np} \rangle$ для моторного масла М-8ДМ, работающего в двигателе внутреннего сгорания Д-245.7ЕЗ автомобиля ГАЗ-3309, существенно влияет на цикличность поставки данного смазочного материала в границах технического обеспечения. При этом следует отметить, что в процессе постепенного износа элементов двигате-

ля Д-245.7ЕЗ значение n_{np} может уменьшаться на определённую величину. Знание закономерности такого уменьшения влияет на повышение эффективности технического обеспечения, например, парка машин ГАЗ-3309 в определённой организации, а также на повышение коэффициента технической готовности данного парка машин.

В границах данного исследования предельное прогнозируемое значение числа оборотов КВ лимитируемое вязкостью приблизительно равно $n_{np} \approx 11,7$ млн. об.

Приблизённо зависимость изменения объёма масла от числа оборотов КВ двигателя Д-245.7ЕЗ, с учётом полученного прогноза по вязкости, а также с учётом, например, двух последующих замен масла, показана на рис. 6.

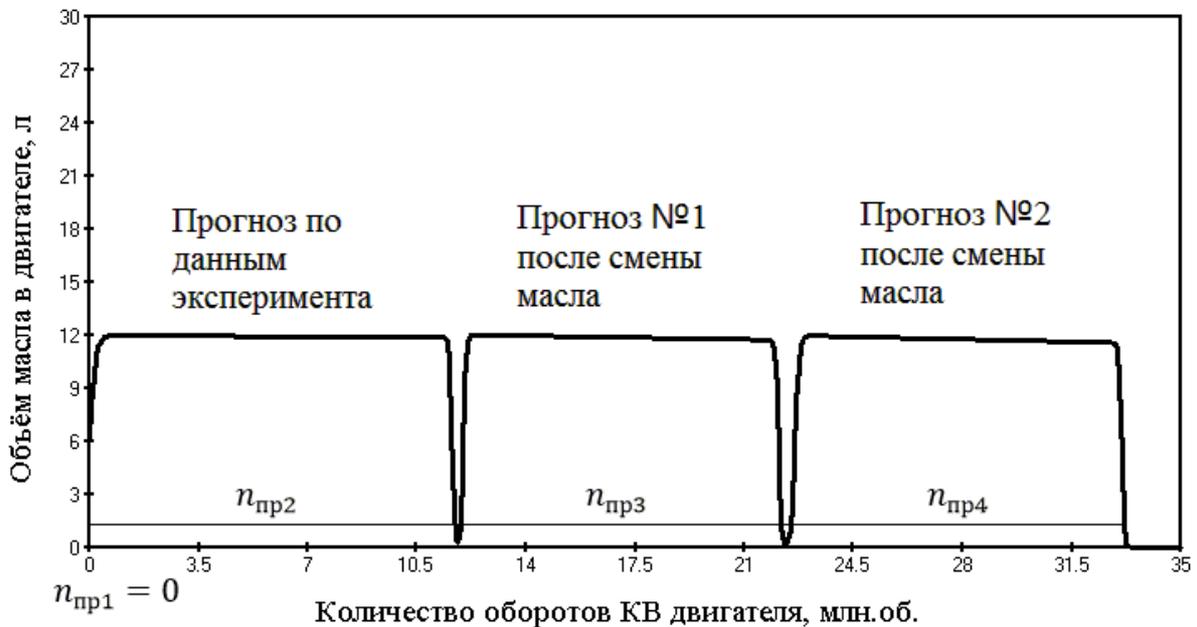


Рис.6. Ориентировочная зависимость изменения объёма масла от числа оборотов КВ двигателя Д-245.7ЕЗ

Аналитически, зависимость, представленную на рис.6 можно выразить следующим образом:

$$V(n) = \frac{12 - 0,01n}{1 + \exp(-10(n))} - \frac{12 - 0,01n}{1 + \exp(-25(n - 11,63))} + \frac{12,4 - 0,03n}{1 + \exp(-25(n - 11,99))} - \frac{12,4 - 0,03n}{1 + \exp(-25(n - 22,1))} + \frac{12,9 - 0,04n}{1 + \exp(-15(n - 22,63))} - \frac{12,9 - 0,04n}{1 + \exp(-25(n - 33,1))}, \quad (5)$$

При анализе зависимости (5) видно, что в числителях стоят зависимости, показывающие постепенное уменьшение объёма масла в процессе эксплуатации, что связано с процессами окисления, испарения, срабатывания присадок, утечек и т.д. При этом на рис.6 показано, что n_{np} уменьша-

ется, а скорость уменьшения масла в процессе эксплуатации от замены к замене – увеличивается, что преимущественно связано с износом двигателя в целом и загрязнением картера.

С другой стороны, замену моторного масла в соответствии с установленным регламентом технического обслуживания (в некоторых организациях) двигателя внутреннего сгорания Д-245.7ЕЗ следует осуществлять при достижении числа оборотов КВ, равного 25,5 миллионов:

$$n_{npi} = 25,5 \text{ млн. об.} = \text{const}, i = 1, 2 \dots m. \quad (6)$$

Если исходить из условия замены (6), то время работы двигателя между смежными поставками масла на одну единицу техники можно считать приблизительно одинаковым. Интервал поставки (цикл поставки) – это период времени между двумя смежными поставками, который в границах данной работы может быть выражен следующим образом:

$$Ц_{ni} = t_{pdi} + t_{ndi} + (t_{ози} + t_{эзи} + t_{ди}) + t_{moi} + t_{mki}, i = 1, 2, \dots m, \quad (7)$$

где $Ц_{ni}$ – i -й цикл поставки; t_{pdi} – суммарное время работы двигателя до достижения n_{npi} ; t_{ndi} – суммарное время покоя двигателя между периодами эксплуатации; $t_{ози}$ – время оформления заказа и передачи его поставщику; $t_{эзи}$ – время выполнения заказа поставщиком; $t_{ди}$ – время на доставку смазочного масла заказчику; t_{moi} – суммарное время технического обслуживания, связанного с заменой моторного масла; t_{mki} – суммарное время технического контроля состояния моторного масла.

В случае использования условия замены масла (6) при постоянстве слагаемых в (7) циклы будут равными и большими по величине, что негативно сказывается на состоянии техники, поскольку слагаемое t_{mki} не существенно и всё обусловлено регламентом. В случае проведения системного технического контроля состояния масла с использованием современных приборов (рис. 1, 2, 3), слагаемое t_{mki} будет увеличено, а слагаемое t_{pdi} будет определяться диагностическими параметрами.

Формулу (7) с учётом прогнозов в результате диагностики можно записать следующим образом (прогнозируемый цикл поставки):

$$Ц_{ni} \approx \frac{n_{npi}}{N_{cp}} + t_{ndi} + (t_{ози} + t_{эзи} + t_{ди}) + t_{moi} + t_{mki}, i = 1, 2, \dots m, \quad (8)$$

где N_{cp} – средняя частота вращения коленчатого вала двигателя. В случае использования (8), как видно из рис. 6 циклы поставки постепенно будут уменьшаться за счёт качественного и своевременного технического контроля состояния масла, что позволит повысить долговечность ответственных пар трения, а соответственно и поддерживать коэффициент технической готовности совокупности машин ГАЗ-3309 на высоком уровне в границах технического обеспечения.

Выводы

На основании проведённого исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. В ходе работы моторного масла М-8ДМ в двигателе Д-245.7ЕЗ автомобиля ГАЗ-3309 при совершении коленчатым валом 14,112 млн. об. происходит снижение вязкости на 25%, увеличение содержание сажи в 46 раз, снижение обще-щелочного числа в 39 раз, увеличение содержания воды в 7 раз, увеличение степени окисления в 12 раз, что говорит о необходимости более ранней замены масла относительно регламентированных 25,5 миллионов оборотов и необходимости увеличения частоты его поставки в границах технического обеспечения.

2. Характеристики свойств моторного масла М-8ДМ существенно изменяются в сравнении с исходными показателями свежего моторного масла и требуют периодического системного контроля современными диагностическими средствами для обеспечения высокого коэффициента технической готовности совокупности машин и повышения эффективности технического обеспечения.

3. В границах данной работы создана модель непрерывной оценки пригодности моторного масла по различным оценочным параметрам, что дает возможность прогнозировать изменения основных характеристик с целью определения объема проведения работ по обслуживанию системы смазки и других систем двигателя внутреннего сгорания Д-245.7ЕЗ, мероприятий очередного технического обслуживания, позволяющих корректно определять циклы поставки в границах технического обеспечения.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [7-39].

Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Григорьев М.А., Бунаков Б.М., Долецкий В.А. Качество моторного масла и надежность двигателей. М.: Издательство стандартов, 1981. 232 с.

2. Моторные масла / Р. Балтенас, А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В. Шергалис. Москва – СПб.: Альфа-Лаб, 2000. 272 с.

3. Попов С.Ю. Повышение эксплуатационных свойств ремонтно-восстановительных составов при их использовании в двигателях тракторов: дис. ... канд техн. Наук: 05.20.03 / Попов Сергей Юрьевич. Тамбов, 2014. 218 с.

4. Состояние нефтяных смазочных композиционных материалов в подшипниковых узлах в процессе тепломассообмена / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 12. Ч. 1. С. 117-124.

5. Общие свойства и особенности взаимодействия дисперсных компонентов смазочного материала А.Д. Бреки, О.В. Толочко, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков / Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 319-326.

6. Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич. Санкт-Петербург, 2011. 19 с.

7. Gvozdev A.E. Effect of the stress state on superplasticity of hard-to-deform high-speed powder steel // *Металлы*. 1994. № 4. Р. 127-131.

8. Расчет кластерной структуры расплава, ее влияние на образование наноаморфных твердых фаз и их структурную релаксацию при последующем нагреве / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, А.В. Афанаскин, Е.А. Гвоздев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. № 6. С. 12-16.

9. Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation // A.E. Gvozdev, D.N. Bogolyubova, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 1. Р. 32-40.

10. Role of nucleation in the of first-order phase transformations / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 4. Р. 283-288.

11. Комплексные задачи теории пластичности: монография / Н.Д. Тутьшкин, А.Е. Гвоздев, В.И. Трегубов, Ю.В. Полтавец, Е.М. Селедкин, А.С. Пустовгар, В.И. Золотухин, Г.М. Журавлев, В.И. Золотухин; 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 408 с.

12. Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев // *Технология металлов*. 2016. № 1. С. 23-32.

13. Синтез и триботехнические свойства композиционного покрытия с матрицей из полиимида (Р-ООО)ФТ и наполнителем из наночастиц дисульфида вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков, Ю.А. Фадин // *Материаловедение*. 2016. № 4. С. 44-48.

14. Влияние разнотерности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // *Материаловедение*. 2014. № 7. С. 23-26.

15. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels / A.E. Gvozdev, I.V. Minaev, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015. Т. 6. № 1. Р. 41-44.

16. Ресурсы деформационной способности различных материалов: учебное пособие / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, А.А. Калинин, С.Е. Александров, Н.Е. Стариков, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, С.Н. Кутепов, Е.В. Цой, Д.С. Клементьев, Е.Б. Соломатникова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 172 с.

17. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.

18. О состоянии предпревращения металлов и сплавов: монография / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 245 с.

19. Особенности структурных и фазовых превращений в титановых заготовках в процессе высокоскоростного пластического деформирования: монография / Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, А.Д. Бреки, В.В. Медведева, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий.; под ред. Н.А. Крылова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 202 с.

20. Сопряженные поля в упругих, пластических, сыпучих средах и металлических труднодеформируемых системах: монография / Э.С. Макаров, В.Э. Ульченкова, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 526 с.

21. Новые конструкционные материалы: учебное пособие / Н.Е. Стариков, В.К. Зеленко, О.В. Кузовлева, А.Н. Сергеев, В.Ю. Кузовлев, А.А. Калинин, А.В. Маляров; под. общ. ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 296 с.

22. Материаловедение: учебник для вузов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев., В.К. Зеленко, А.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е доп. и испр. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 469 с.

23. Технология металлов и сплавов: учебник / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, О.В. Кузовлева, Г.М. Журавлёв, Д.А. Провоторов.; Под ред. проф. Н.Н. Сергеева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 490 с.

24. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

25. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 32-47.

26. Анализ теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания металлов и сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 3(72). С. 6-33.

27. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

28. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92.

29. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95.

30. Патент на полезную модель 2016122692/28 (166249) Образец для определения когезионной прочности газотермических порошковых покрытий / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, И.В. Тихонова, А.Д. Бреки, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, А.А. Калинин, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, М.В. Ушаков; заявитель и патентообладатель Гвоздев Александр Евгеньевич. № 2016122692/28 заявл. 08.06.16; опубл. 20.11.16, Бюл. № 32.

31. Патент на полезную модель 2016142134 (170385) Образец для определения адгезионной прочности покрытий / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, И.В. Тихонова, А.Д. Бреки, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, А.А. Калинин, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.И. Кузнецова, А.В. Казакова, Д.Н. Романенко, Е.Ф. Романенко, В.Э. Лисицина; заявитель и патентообладатель Гвоздев Александр Евгеньевич. № 2016142134 (17385) заявл. 26.10.16; опубл. 24.04.17, Бюл. № 12. 6 с.

32. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

33. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь. 2017. № 6. С. 26-39.

34. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

35. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 32-36.

36. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 56-59.

37. Maximum plastic strengthening in tool steels / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, A.E. Cheglov, N.N. Sergeev, O.M. Gubanov // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. № 6. P 399-411.

38. Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния, для узлов трения управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 166 с.

39. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Гольшнев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

Чечулин Константин Николаевич, адъюнкт, che4ulin.konstantin@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии Хрулёва А.В.,

Бреки Александр Джалюльевич, канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой МиОК, с.н.с. лаборатории ИЭС, albreki@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт проблем машиноведения РАН,

Молоков Илья Евгеньевич, д-р военных наук, профессор, зав. кафедрой общенаучных и общетехнических дисциплин, mie78italy@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии Хрулёва А.В.,

Гвоздев Александр Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, gwozdev.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Кутенов Сергей Николаевич, канд. пед. наук, kutepov.sergei@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Пантюхин Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, olegpantjukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

*THE IMPACT OF CHANGES IN THE SUITABILITY OF MOTOR OIL M-8ДМ
IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE D-245.7E3 GAZ-3309 ON THE CYCLES
OF ITS SUPPLY WITHIN THE BOUNDARIES OF THE TECHNICAL SUPPORT*

K.M. Chechulin, A.D. Breki, I.E. Molokov, A.E. Gvozdev, S.N. Kutepov, O.V. Pantjuhin

The paper presents the results of laboratory tests of samples of motor oil M-8ДМ at different stages of operation of the internal combustion engine D-245.7E3 of the GAZ-3309. The changes in the operation of such diagnostic indicators as permittivity, alkali number, viscosity, oxidation, sulfation and nitriding, as well as the content of water, glycol and soot are shown. By calculation using the experimental data obtained based on the suitability of the oil M-8ДМ on different diagnostic parameters from the number of revolutions of the crankshaft. It is possible to forecast the replacement of lubricating oil M-8ДМ through dependency analysis of the suitability of various indicators. The interrelation between the analysis of the suitability of lubricating oil M-8ДМ and cycles of delivery within the boundaries of the hardware.

Key words: technical support, diagnostics, engine oil, operating time, ageing of oils, GAZ-3309, suitability, delivery cycle.

Chechulin Konstantin Nikolaevich, graduated, che4ulin.konstantin@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military academy of material support of the general Hrulyov A.V.,

Breki Alexander Dzhalyulyevich, candidate of technical science, docent, deputy department chair, senior research associate of IES laboratory, albreki@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Institute of problems of engineering science of RAS,

Molokov Ilya Evgenyevich, doctor of military sciences, professor, head of the department, mie78italy@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military academy of material support of the general Hrulyov A.V.,

Gvozdev Aleksandr Evgen'yevich, doctor of technical science, professor, gvozdev.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Kutepov Sergey Nikolaevich, candidate of pedagogical science, kutepov.sergei@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Pantjuhin Oleg Viktorovich, candidate of technical science, docent, olegpantjukhin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ПЛАНИРОВАНИЕ СНАБЖЕНИЯ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ МАШИН С ОБЪЕМНЫМ ГИДРОПРИВОДОМ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ РИСКА

П.А. Сорокин, Н.Н. Гринчар

Изложены вопросы возникновения рисков организации снабжения запасными частями машин с гидроприводом. Рассматриваются источники появления рисков в сфере эксплуатации и их некоторые качественные характеристики. Приведена функциональная модель развития риска на основе методологии управления ресурсами, рисками и надежностью (УРРАН).

Ключевые слова: машины с объемным гидроприводом, отказы, риски, запасные части.

При обеспечении запасными частями строительных, путевых и грузоподъемных машин с объемным гидроприводом машин в сфере эксплуатации наибольшие затруднения вызывает проблема определения рационального количества гидроагрегатов, хранящихся на складах компании в каждый отдельный период времени. Принципиально возможны три сценария:

- 1) на складе находится избыточное количество запасных частей;
- 2) на складе находится необходимое и достаточное количество запасных частей;
- 3) на складе недостаточно запасных частей.

Сценарий № 3 очевидно не следует допускать на производстве, так как он приводит к простоям в работе машин, а, следовательно, к экономическим потерям вследствие несвоевременного выполнения работ и штрафам.

Сценарий № 1, в свою очередь, несмотря на то, что он обеспечивает 100 %-ную гарантию наличия детали, также является не оптимальным с точки зрения экономической эффективности, так как в условиях рыночной экономики излишек деталей неизбежно приводит к «омертвлению» капитала и увеличению стоимости жизненного цикла машины [1].

В общем случае же, задачей является достижение минимальной стоимости жизненного цикла машины при сохранении необходимого и достаточного уровня надежности и минимизации простоев. Стоимость жизненного цикла технической системы включает затраты единовременного (инвестиции), а также затраты текущего характера (эксплуатационные расходы) за срок службы [2]. При расчете этого показателя следует учитывать тот факт, что вынужденный простой вследствие наступившего отказа

и/или отсутствия необходимых запасных частей также увеличивает стоимость жизненного цикла машины (так как при расчете этого показателя следует учитывать не только прямые затраты, но и косвенные, такие как штрафы из-за невыполненных в срок работ. Подобного рода расходы могут быть минимизированы на основе улучшения контроля состояния машины и поставок запасных частей, что, в свою очередь, увеличит эксплуатационные расходы на содержание машины.

При этом очевидно, что существует оптимальная зона, в которой стоимость жизненного цикла машины минимальна. Поиск и способы достижения данной зоны являются в современных условиях одной из самых актуальных задач предприятий и организаций, в том числе эксплуатирующих машины с гидравлическим оборудованием.

С точки зрения управления запасами минимальная стоимость жизненного цикла достигается в сценарии № 2. Однако, для его реализации необходимо точно спрогнозировать отказы по периодам, и, следовательно, необходимое количество запасных частей на складе. Так как сделать это в силу различного рода неопределенностей и других объективных причин практически невозможно, возникает ситуация, в которой нельзя со 100 % вероятностью сказать, сколько потребуется деталей или, другими словами, хватит ли N деталей на конкретный период времени. Такие ситуации принято описывать с помощью понятия «риск».

Следует оговориться, что не для всех типов деталей этот вопрос является важным. Важность учета риска зависит от таких параметров как стоимость детали и срока поставки детали. Матрица уровней важности учета риска представлена в таблице.

Матрица уровней важности учета риска

Срок поставки \ Стоимость детали	Небольшой	Средний	Большой
Низкая	Незначительный	Умеренный	Значительный
Средняя	Умеренный	Средний	Высокий
Высокая	Значительный	Высокий	Очень высокий

Согласно ГОСТ Р 51901.4-2005 «Менеджмент риска» [3] под риском понимается сочетание вероятности появления опасного события и его последствий для целей проекта. Тогда, матрицу (см. таблицу) можно преобразовать в трехмерную, где по оси «z» будут располагаться возможные последствия появления опасных событий. В первом приближении, они делятся на легкие, средние, тяжелые и катастрофические.

В концепции «Комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте» [4] понятие риска включает два элемента: вероятность возникновения события или сочетания событий, ведущих к опасности или частота возникновения таких событий; последствия опасности.

Анализ многочисленных определений риска позволяет выявить основные моменты, которые являются характерными для рискованной ситуации, такие как:

- наличие двух или более альтернативных вариантов развития ситуации;
- существует вероятность реализации негативного варианта развития ситуации;
- полная и достоверная информация об объекте или процессе отсутствует;
- можно определить вероятности исходов и ожидаемые результаты.

Для большинства сфер экономики, в том числе для машиностроения более характерно описание понятия риска с исключительно негативной точки зрения. Так рисковыми называются ситуации, в которых существуют вероятность негативного события (например, отказа узла или агрегата) и последствия негативного события. При этом, в зависимости от типа исследуемого риска могут рассматриваться различные виды потерь. В случае с отказом это могут быть финансовые потери, потери времени, экологические потери, угрозы жизни и здоровью людей и т.д. При математическом описании уровень риска прямо пропорционален вероятности развития негативного сценария и тяжести последствий. Так, при вероятности 0 % риск минимален, а при 100 % - максимален.

Также в некоторых случаях понятие риск используется исключительно для описания неопределенности. В таких случаях риск считается большим, если отсутствует какой-либо наиболее вероятный сценарий развития ситуации (например, при наличии четырех различных вариантов развития событий с вероятностью реализации каждого из них 25 %). В случае же, когда вероятность развития даже негативного сценария > 90 %, риск минимален, потому что практически достоверно известно, что произойдет.

В вопросе обеспечения строительных, путевых и грузоподъемных машин с объемным гидроприводом запасными частями можно рассмотреть два типа рисков:

- 1) логистические риски – риски того, что запасные части не будут поставлены в срок;
- 2) технические риски – риски того, что произойдет отказ узла или агрегата.

Под техническими рисками понимаются риски отказов в работе узла или агрегата, и, как следствие, простой персонала и машины и затрат на восстановление работоспособности. Данный тип рисков возникает при

функционировании любой машины, вне зависимости от ее размера и параметров. Технические риски закладываются на проектной стадии по объективным обстоятельствам - любое оборудование имеет строго определенный уровень показателей надежности.

Причины возникновения технических рисков:

- ошибки проектирования;
- недостаток технологии и неправильный выбор оборудования;
- неверное определения нагрузок, воздействующих на рабочие органы машин;
- недостатков в системе управления;
- недостаток квалифицированной рабочей силы;
- отсутствия опыта работы с новым оборудованием;
- отсутствие или неправильное проведение ТО и ремонта.

На железнодорожном транспорте в настоящее время принята система УРРАН - «Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла» [5]. Она представляет собой комплекс стандартов и методик, направленных на повышение надежности на транспорте, в частности, за счет управления рисками. На рисунке приведена функциональная модель возникновения и развития риска.

Качественный анализ технического риска отказа аналогично методологии УРРАН позволяет выделить следующие уровни тяжести последствий отказа [6]:

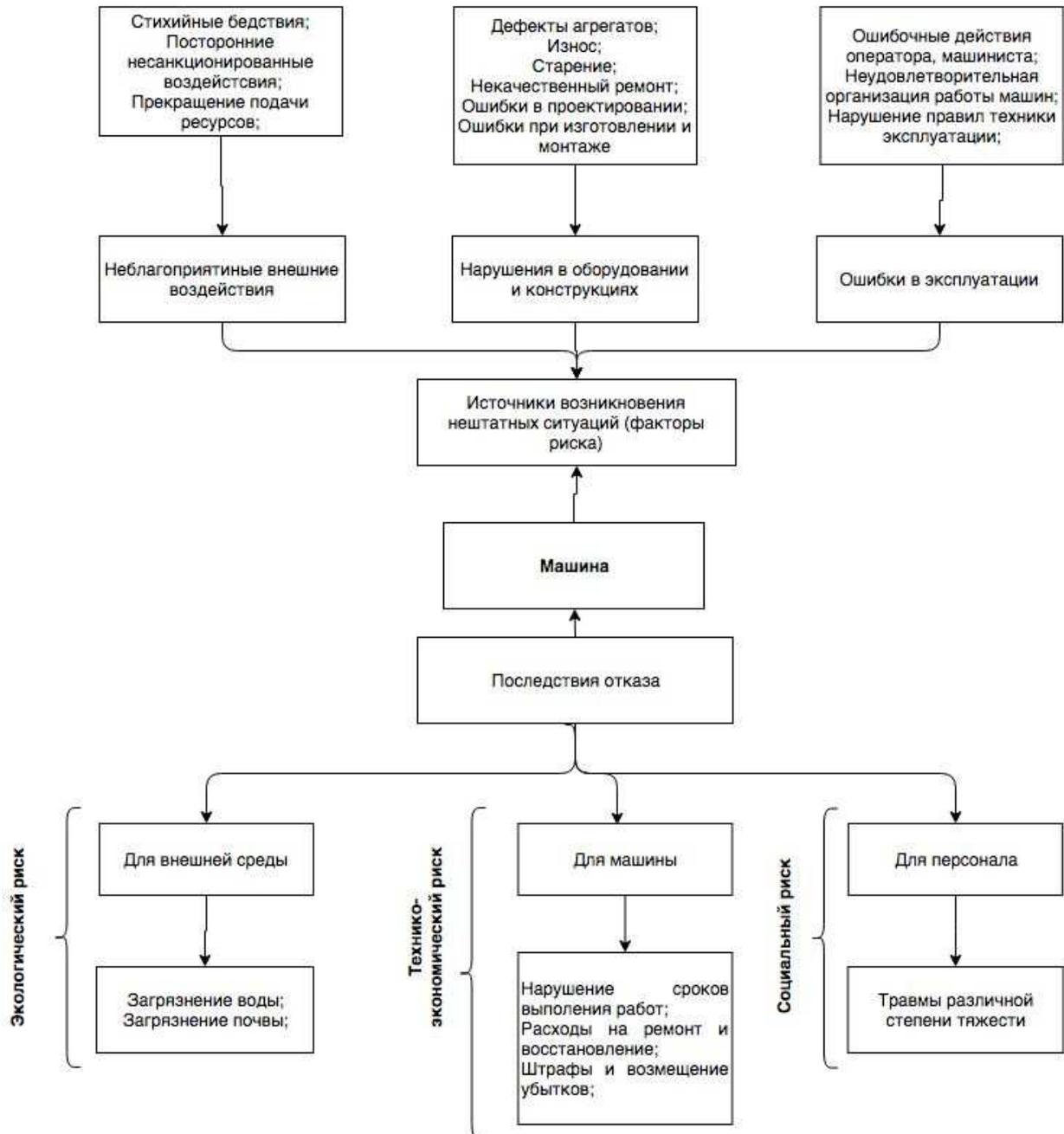
1. Отказы практически не влияющие на экономические и экологические показатели работы машины. К ним относятся мелкие отказы, устраняемые немедленно или в ходе ЕО, например регулировка клапанов и дросселей, долив масла в бак и прочее.

2. Параметрические отказы, приводящие к съёму и замене агрегата в процессе послесменного обслуживания. Эти отказы не влияют на ритмичность работы, но могут ухудшать такой показатель, как время цикла. Экономические потери в этом случае сводятся к стоимости заменяемого агрегата и стоимости производства работ

3. Отказы, приводящие к задержке в работе машины. Они выявляются либо во время смены, либо в ходе предсменных проверок. При наличии такого отказа смена может быть завершена, но затем производится замена агрегата и переналадка системы с задержкой выхода в следующую смену. Нетрудно видеть, что вторая и третья степени тяжести близки и при известных условиях могут переходить одна в другую.

4. Отказы, приводящие к нарушению или к изменению технологических процессов и остановки производства более чем на одну смену. Экономические потери могут быть в этом случае весьма велики и включать потери при простое всего комплекса машин и работников технологической цепочки.

5. Отказы приводящие к аварийным последствиям, т.е. к выходу из строя не только агрегатов гидропривода, но и повреждению машины в целом (например при опрокидывании) и невозможностью её дальнейшей эксплуатации.



Функциональная модель развития риска

6. Отказы, приводящие к последствиям аналогично предыдущему случаю, но вторичные разрушения и повреждения носят характер, делающий невозможным восстановление машины, даже в процессе капитального ремонта.

7. Отказы приводящие к катастрофическим последствиям (с единичными жертвами).

8. Отказы приводящие к катастрофическим последствиям (с многочисленными жертвами). Для строительных машин с объемным гидравлическим приводом такая ситуация является нехарактерной.

Определение потребного количества запасных частей также зависит от принятого метода технического обслуживания и ремонта: предупредительно-профилактический, по состоянию или компенсационный.

Компенсационный метод является практически безрисковым, так как замена деталей происходит только после их отказа. Применение такого метода ТО и ремонта имеет смысл только для тех типов агрегатов и деталей, отказ которых практически не влияет на работу системы в целом, а, следовательно, отсутствие нужной запасной части в конкретный момент не приведет к простоям и убыткам.

Предупредительно-профилактический метод предполагает замену при достижении определенного значения наработки (моточасов). При этом, в основном, замена предполагается при таком уровне наработки, при котором отказ не предвидится или крайне маловероятен. Применение такого метода приводит к минимизации рисков, как несвоевременного отказа, так и отсутствия запасной части на складе. Прогноз времени замены в таком случае ведется исходя из времени достижения предельной наработки на отказ из паспорта детали. Но с другой стороны, такой подход зачастую приводит к замене детали или агрегата, ресурс которых не выработан (в некоторых случаях значительно не выработан), что увеличивает стоимость жизненного цикла машины и снижает ее экономическую эффективность.

Оптимальный период замены может быть определен при применении методов «по состоянию», при которых агрегат или деталь заменяются при достижении ими определенного значения ключевых характеристик (применительно к гидравлическому оборудованию это коэффициент полезного действия насоса). Точное значение КПД определяется инструментальными методами.

Однако вследствие нестабильности характера изменения объемного КПД для одной конкретной машины (агрегата), планирование замен с достаточной определенностью возможно лишь в краткосрочной перспективе. Вследствие этого необходимо либо вести постоянный инструментальный контроль с помощью внешних средств (гидротестеры) или встроенных датчиков давления и расхода, либо же воспользоваться не инструментальными методами оценки изменения объемного КПД, включающие, в частности, современные методы компьютерного моделирования.

Как правило, для большинства современных машин встроенные системы диагностики гидроприводов являются делом будущего, вследствие чего актуальным является разработка методики оценки потребного коли-

чества запасных частей, которая с одной стороны учитывала бы неопределенность и факторы риска, а с другой – использовала бы легкодоступные или общеизвестные данные об объекте.

Список литературы

1. Управление инновациями на железнодорожном транспорте : монография / Н.П. Терешина, И.Н. Дедова, Ю.И. Соколов, В.А. Подсорин; под общ. ред. Н.П. Терешиной. М.: МИИТ, 2014. 304 с.
2. Управление жизненным циклом технических систем на железнодорожном транспорте : учеб. для вузов / Н.П. Терешина, В. А. Подсорин. М.: Вега-Инфо, 2012. 230 с.
3. ГОСТ Р 51901.4-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению при проектировании. М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.
4. СТО 1.02.033-2010 Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок идентификации опасностей и рисков. М.: Техинформ, 2011. 12 с.
5. СТО РЖД 02.037-2011 Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Управление стоимостью жизненного цикла систем, устройств и оборудования хозяйств. ОАО «РЖД» (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.03.2012 № 560-р) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения: 10.06.2018).
6. Гринчар Н.Г. Надежность гидроприводов строительных, путевых и подъемно-транспортных машин: учебное пособие. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. 301 с.

Сорокин Павел Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, pavalsor@rambler.ru, Россия, Москва, Российский университет транспорта (МИИТ),

Гринчар Николай Николаевич, канд. экон. наук, ст. преподаватель, navydragon@inbox.ru, Россия, Москва, Российский университет транспорта (МИИТ)

PLANNING OF SUPPLYING SPARE PARTS OF MACHINES WITH VOLUME HYDRAULIC DRIVE WITH THE ACCOUNT OF RISK FACTORS

P.A. Sorokin, N.N. Grinchar

Contains the risks associated with the supply of spare parts for machines with hydraulic drive. The sources of information risks in the operation sphere and their some qualitative characteristics are described. A functional model of risk development based on the resource, risks and reliability management (URRAN) methodology is given.

Key words: machines with hydraulic drive, crushes, risks, spare parts.

Sorokin Pavel Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, pavalsor@rambler.ru, Russia, Moscow, Russian University of Transport (MIIT),

Grinchar Nikolai Nikolaevich, candidate of economics sciences, senior lecturer, navydrag-on@inbox.ru, Russia, Moscow, Russian Transport University (MIIT)

ДИФРАКЦИЯ ЗВУКА В ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ НА КОНЕЧНОМ УПРУГОМ ЦИЛИНДРЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

С.А. Скобельцын, Н.Ю. Пешков

Представлено решение задачи дифракции плоской звуковой волны на конечном упругом цилиндре, на боковую поверхность которого нанесен слоисто-неоднородный слой. Цилиндр находится в полупространстве, заполненном идеальной жидкостью. Граница полупространства является акустически жесткой или акустически мягкой поверхностью. Решение проводится на основе линейной теории упругости и модели распространения малых возмущений в идеальной жидкости с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Приведены результаты расчета диаграмм направленности рассеянного звукового поля в дальней зоне, которые показывают влияние геометрических и материальных параметров цилиндра на дифракцию звука.

Ключевые слова: рассеяние звуковых волн, полупространство, неоднородный упругий цилиндр, метод конечных элементов, диаграмма рассеяния.

Введение

Решение задачи дифракции звуковых волн на упругом теле существенно зависит от формы тела и свойств его материала. Полученное решение задачи дифракции может быть использовано для идентификации параметров упругого тела. Такие решения могут быть использованы при разработке методов исследования в ультразвуковой диагностике, дефектоскопии и гидроакустике.

Рассеяние звуковых волн на однородных упругих телах цилиндрической формы исследовалось в работах [1, 2]. Изменение характеристик рассеяния звука упругих тел можно осуществить с помощью покрытий в виде непрерывно-неоднородного упругого слоя. Дифракция звуковых волн на цилиндрических упругих однородных телах с непрерывно-неоднородными покрытиями рассматривалась в [3, 4].

Широкие возможности для исследования задач дифракции дает использование метода конечных элементов [5 – 7], который уже много лет с успехом применяется в решении различных практических задач гидродинамики и теории упругости. В монографии [7] подробно изложены различные аспекты использования МКЭ при решении задач о рассеянии звука объектами различного типа: жесткими, мягкими, упругими.

В данной работе представлено решение задачи об отражении плоской звуковой волны упругим цилиндром, боковая поверхность которого покрыта неоднородным слоем, с использованием метода конечных элементов. Предполагается, что цилиндр расположен вблизи плоской поверхности идеальной жидкости. Сама граница жидкости является жесткой или идеально мягкой. Такого рода задачи решались для однородных тел и тел,

имеющих другую форму, в работах [8, 9]. Здесь, как и в указанных исследованиях, используется метод замены границы полупространства на симметрично расположенную копию препятствия и решения задачи с двумя телами в неограниченной области.

Постановка задачи

Пусть у границы полупространства Π , заполненного идеальной жидкостью с плотностью ρ_0 и скоростью звука c_0 , находится упругий объект S , внутренняя (основная) часть которого – упругий однородный цилиндр радиуса R , имеющий высоту H . На боковую поверхность цилиндра нанесен неоднородный упругий слой толщины δ . Считается заданным d – расстояние от центра цилиндра O_1 до Π . Также известны модули Юнга E и коэффициенты Пуассона ν для однородной части тела – E_1, ν_1, ρ_1 , и для внешнего слоя – $E(\mathbf{r}), \nu(\mathbf{r}), \rho(\mathbf{r})$, где \mathbf{r} – радиус-вектор точки пространства. Граница полупространства является идеально жесткой или идеально мягкой. На тело набегают гармоническая плоская звуковая волна с потенциалом смещений

$$\Psi_0 = \exp[i(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} - \omega t)], \quad (1)$$

где \mathbf{k}_0 – волновой вектор падающей волны ($|\mathbf{k}_0| = k_0 = \omega/c_0$); ω – круговая частота; t – время. Без ограничения общности полагается $|\Psi_0| = 1$. Поскольку падающая волна является гармонической, то в установившейся фазе колебаний такие характеристики движения как потенциалы; векторы смещений, скорости; давления; компоненты тензоров напряжений и деформаций будут иметь зависимость от времени вида $\exp(-i\omega t)$ как и в падающей волне. Поэтому далее для функций, зависящих и от координат и от времени, зависимость от времени $\exp(-i\omega t)$ будем опускать.

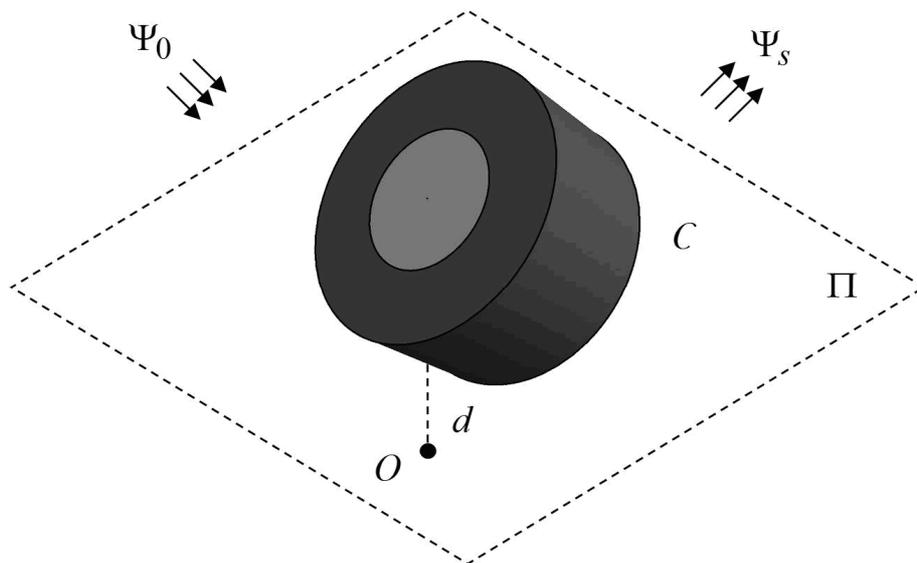


Рис. 1. Геометрия задачи

Геометрическая схема задачи представлена на рис. 1. Символом Ψ_s на нем условно показан потенциал смещений в рассеянной волне, который требует определения в задаче. Точка O на рисунке – проекция центра цилиндра на плоскость Π .

Введем глобальную ортогональную декартову систему координат $Oxyz$ так, чтобы плоскость Π совпала с координатной поверхностью $z = 0$. Будем считать, что направление вектора \mathbf{k}_0 в (1) задается углом θ_0 между осью Oz и \mathbf{k}_0 , а также углом φ_0 между осью Ox и проекцией \mathbf{k}_0 на плоскость Π . Тогда в системе $Oxyz$ волновой вектор можно записать в виде $\mathbf{k}_0 = k_0(\sin \theta_0 \cos \varphi_0, \sin \theta_0 \sin \varphi_0, \cos \theta_0)$.

Центр цилиндра O_1 будет иметь координаты $(0, 0, d)$. Также введем локальную систему координат $O_1x_1y_1z_1$ так, чтобы уравнение боковой поверхности Γ_1 однородной части рассеивателя имело каноническую форму

$$x_1^2 + y_1^2 = R^2, \quad -h \leq z_1 \leq h \quad (h = H/2). \quad (2)$$

Каждой точке $M(x_1, y_1, z_1)$ поверхности Γ_1 будет соответствовать точка внешней боковой поверхности тела Γ'_1 с локальными координатами

$$x'_1 = (R + h)\cos \varphi_1, \quad y'_1 = (R + h)\sin \varphi_1, \quad -h \leq z'_1 \leq h, \quad (3)$$

где $\varphi_1 = \arg(x_1 + iy_1)$ – угол между проекцией радиус вектора точки M на плоскость Ox_1y_1 и положительным направлением оси Ox .

Введем параметр q – расстояние от поверхности Γ_1 внутренних точек неоднородного упругого слоя тела C . Тогда любую точку (x'_1, y'_1, z'_1) внутри этого слоя по аналогии с (3) можно представить в виде

$$x'_1 = (R + q)\cos \varphi_1, \quad y'_1 = (R + q)\sin \varphi_1, \quad -h \leq z'_1 \leq h, \quad (4)$$

где $0 \leq q \leq \delta$.

Ориентацию осей локальной системы координат $O_1x_1y_1z_1$ по отношению к глобальной $Oxyz$ будем задавать углами Эйлера α, β, γ так, что координаты связаны выражением

$$(x, y, z) = (x_1, y_1, z_1) \cdot T_\gamma \cdot T_\beta \cdot T_\alpha + (0, 0, d),$$

где

$$T_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad T_\beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}, \quad T_\gamma = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} -$$

матрицы поворота. Эти углы Эйлера будем трактовать как углы поворота цилиндра при задании его ориентации по отношению к поверхности Π , точнее, – по отношению к системе $Oxyz$.

Схематично, геометрия задачи после введения системы координат представлена на рис. 2. Упругое тело на нем представлено сечениями по поверхности T координатными плоскостями системы координат $O_1x_1y_1z_1$. На осях x_1, y_1, z_1 указаны точки r'_x, r'_y и H' с локальными координатами $(R + \delta, 0, 0), (0, R + \delta, 0)$ и $(0, 0, h)$.

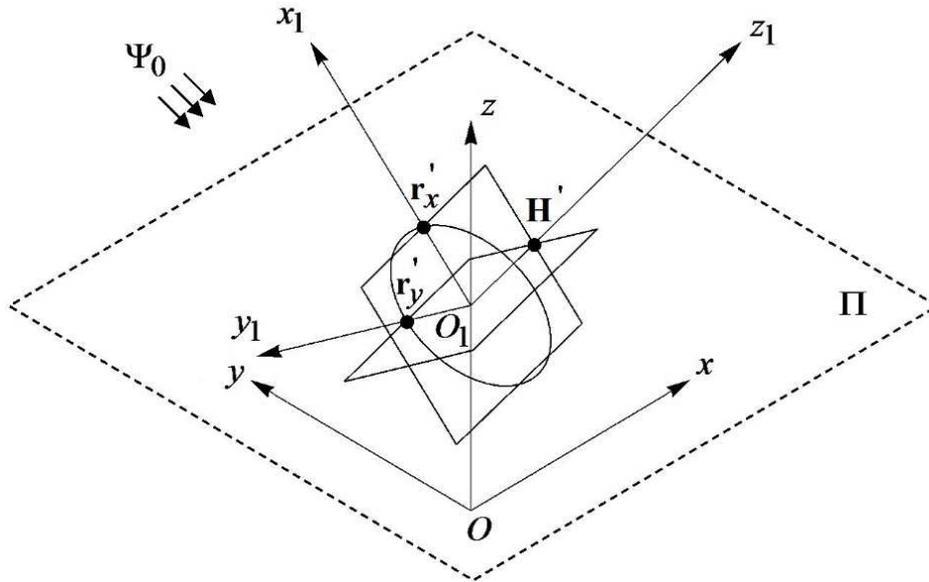


Рис. 2. Введение системы координат

Обозначим области, занимаемые различными средами так: Ω_0 – область полупространства $z > 0$, занятая идеальной жидкостью; Ω_1 – область цилиндра, занятая однородной упругой средой ($x_1^2 + y_1^2 \leq R^2, -h \leq z_1 \leq h$); Ω'_1 – неоднородный слой упругого препятствия ($R^2 \leq x_1^2 + y_1^2 \leq (R + \delta)^2, -h \leq z_1 \leq h$).

В области Ω_0 движение частиц идеальной жидкости определяется потенциалами смещений в падающей Ψ_0 и рассеянной Ψ_s волнах. Смещение \mathbf{u}_0 и давление p_0 в области Ω_0 определяются через эти потенциалы так [10]

$$\mathbf{u}_0 = \text{grad}(\Psi_0 + \Psi_s), \quad p_0 = \rho_0 \omega^2 (\Psi_0 + \Psi_s). \quad (5)$$

При этом потенциал Ψ_s должен удовлетворять уравнению Гельмгольца [10]

$$\Delta \Psi_s + k_0^2 \Psi_s = 0 \quad (6)$$

и условиям излучения на бесконечности.

Предполагается, что движение частиц в препятствии подчиняется законам линейной теории упругости [11]. Обозначим вектор смещений и тензор напряжений в области однородного цилиндра \mathbf{u}_1 и $\boldsymbol{\sigma}_1$ соответственно. Тогда гармонические колебания частиц в однородной части тела S описываются уравнениями движения

$$\operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}_1) = -\rho_1 \omega^2 \mathbf{u}_1, \quad (7)$$

где $\operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}_1)$ – первый инвариант ковариантной производной тензора напряжений $\boldsymbol{\sigma}_1$.

Аналогично, в неоднородном слое препятствия уравнения движения будут иметь вид

$$\operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}) = -\rho \omega^2 \mathbf{u}, \quad (8)$$

где \mathbf{u} и $\boldsymbol{\sigma}$ – вектор смещений и тензор напряжений в Ω'_1 .

Тензор напряжений выражается через компоненты вектора смещений посредством закона Гука, так что уравнения (7), (8) можно рассматривать как системы дифференциальных уравнений второго порядка относительно компонент векторов смещений \mathbf{u}_1 и \mathbf{u} .

На поверхности Γ_1 соединения неоднородного слоя и однородного цилиндра должны быть непрерывными смещения и тензор напряжений:

$$\mathbf{u}_1|_{\Gamma_1} = \mathbf{u}|_{\Gamma_1}, \quad \boldsymbol{\sigma}_{1nn}|_{\Gamma_1} = \boldsymbol{\sigma}_{nn}|_{\Gamma_1}, \quad \boldsymbol{\sigma}_{1n\tau}|_{\Gamma_1} = \boldsymbol{\sigma}_{n\tau}|_{\Gamma_1} \quad (\tau = 1, 2), \quad (9)$$

где $\boldsymbol{\sigma}_{n\tau}$, $\boldsymbol{\sigma}_{1n\tau}$ – компоненты скалярных произведений $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}$, $\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{n}$ (\mathbf{n} – внешняя нормаль к Γ_1); τ – индекс, определяющий два касательных к Γ_1 направления.

На внешней поверхности тела – $\Gamma_1'' = \Gamma_1' \cup \Gamma_1'''$ ($\Gamma_1''' = \Gamma_1^h \cup \Gamma_1^i$, где $\Gamma_1^i = (R^2 \leq x_1^2 + y_1^2 \leq (R+h)^2, z_1 = \pm h)$, $\Gamma_1^h = (x_1^2 + y_1^2 \leq R^2, z_1 = \pm h)$) – поверхности соприкосновения жидкости и упругого материала должны быть непрерывными нормальная компонента вектора смещений и тензора напряжений:

$$u_n|_{\Gamma_1' \cup \Gamma_1^i} = u_{0n}, \quad \boldsymbol{\sigma}_{nn}|_{\Gamma_1' \cup \Gamma_1^i} = -p_0, \quad \boldsymbol{\sigma}_{n\tau}|_{\Gamma_1' \cup \Gamma_1^i} = 0; \quad (10)$$

$$u_{1n}|_{\Gamma_1^h} = u_{0n}, \quad \boldsymbol{\sigma}_{1nn}|_{\Gamma_1^h} = -p_0, \quad \boldsymbol{\sigma}_{1n\tau}|_{\Gamma_1^h} = 0 \quad (\tau = 1, 2),$$

где n – индекс, соответствующий проекции на нормаль (индекс τ на касательные) уже к поверхности Γ_1'' . Величины u_{0n} и p_0 выражаются через потенциалы Ψ_0 и Ψ_s в соответствии с (4).

Наконец, на границе полупространства Π в зависимости от ее типа должно выполняться условие

$$\text{а) } u_{0z}|_{z=0} = 0 \quad \text{или} \quad \text{б) } p_0|_{z=0} = 0, \quad (11)$$

где случай а) соответствует варианту жесткой поверхности Π , а б) – абсолютно мягкой.

Таким образом, в математической постановке задача состоит в нахождении решений уравнений (6), (7) и (8), удовлетворяющих граничным условиям (9), (10), (11) и условиям излучения (7).

Решение задачи

Для решения задачи применим подход, использованный в [12] при решении задачи о рассеянии звука сфероидом в присутствии подстилающей поверхности. Исключим из рассмотрения границу полупространства Π , расширив область Ω_0 до полного пространства, введя в рассмотрение второй рассеиватель C' , являющийся зеркальным отражением цилиндра C относительно плоскости $z=0$, и вторую падающую плоскую волну Ψ_1 , распространяющуюся в направлении волнового вектора $\mathbf{k}_1 = k_0(\sin \theta_0 \cos \varphi_0, \sin \theta_0 \sin \varphi_0, -\cos \theta_0)$.

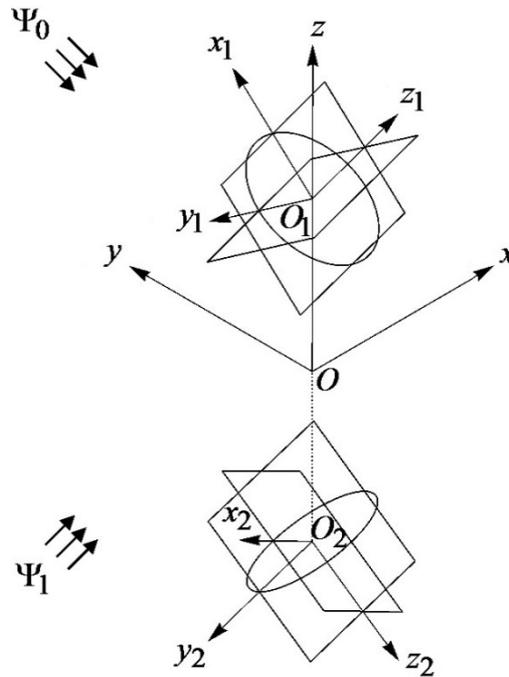


Рис. 3. Введение второго тела

Рис. 3 иллюстрирует это изменение постановки задачи. На нем O_2 – центр тела E' (глобальные координаты $(0, 0, -d)$), $O_2 x_2 y_2 z_2$ – локальная система координат, в которой поверхность однородной части тела E' имеет вид аналогичный (2). Эту поверхность обозначим Γ_2 , область второго цилиндра – Ω_2 . Внешнюю поверхность цилиндра, определяемую соотношениями аналогичными (3), обозначим Γ_2' , а область неоднородного слоя между Γ_2 и Γ_2' – Ω_2' .

В случае абсолютно жесткой – а) или абсолютно мягкой – б) поверхности Π потенциал смещений во второй падающей плоской волне должен быть равен [13]

$$\text{а) } \Psi_1 = \exp(i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}), \quad \text{б) } \Psi_1 = -\exp(i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}).$$

Тогда граничные условия (11) на плоскости $z = 0$ будут удовлетворены автоматически.

Таким образом, исходная задача сводится к задаче дифракции двух плоских волн на двух идентичных телах, находящихся в безграничном пространстве Ω_0 , заполненном однородной идеальной жидкостью.

В силу линейной постановки задачи следует найти решение задачи дифракции каждой из двух плоских волн на двух цилиндрах, а затем полученные результаты просуммировать.

Рассмотрим корректировку математической постановки задачи о дифракции плоской звуковой волны Ψ_0 на двух упругих цилиндрах с неоднородными внешними слоями. Уравнения (7), (8) должны быть продублированы для областей Ω_2 и Ω'_2 соответственно. Обозначим векторы смещений и тензоры напряжений в областях Ω_2 и Ω'_2 через \mathbf{u}_2 , σ_2 и \mathbf{u}' , σ' .

На поверхностях Γ_2 , Γ_2'' должны быть введены граничные условия, подобные (8), (9)

$$\mathbf{u}_2|_{\Gamma_2} = \mathbf{u}', \quad \sigma_{2nn}|_{\Gamma_2} = \sigma'_{nn}, \quad \sigma_{2n\tau}|_{\Gamma_2} = \sigma'_{n\tau}; \quad (12)$$

$$u'_n|_{\Gamma_2' \cup \Gamma_2^i} = u_{0n}, \quad \sigma'_{nn}|_{\Gamma_2' \cup \Gamma_2^i} = -p_0, \quad \sigma'_{n\tau}|_{\Gamma_2' \cup \Gamma_2^i} = 0; \quad (13)$$

$$u_{2n}|_{\Gamma_2^h} = u_{0n}, \quad \sigma_{2nn}|_{\Gamma_2^h} = -p_0, \quad \sigma_{2n\tau}|_{\Gamma_2^h} = 0 \quad (\tau = 1, 2),$$

где индексы n и τ в (12) определяют нормаль и касательные к Γ_2 , а в (13) – к Γ_2'' .

В новой постановке условия (7) сохраняют свой вид, а условия (11) исключаются.

Заметим, что в общем случае зависимостей $E(\mathbf{r})$, $\nu(\mathbf{r})$, $\rho(\mathbf{r})$ для неоднородного слоя рассеивателя аналитическое решение поставленной задачи невозможно.

Будем решать сформулированную задачу численно с использованием метода конечных элементов на основе подхода, предложенного в работах [12, 14, 15].

В соответствии с этим подходом в области жидкости, прилегающей к телам S и S' , выделим сферическую поверхность Γ_0 радиуса R_0 такого, чтобы внутри этой поверхности оказались оба препятствия и некоторая область жидкости Ω_0' , содержащая упругие тела. При этом минимальное расстояние от упругих тел до поверхности Γ_0 должно иметь порядок характерного размера упругого тела.

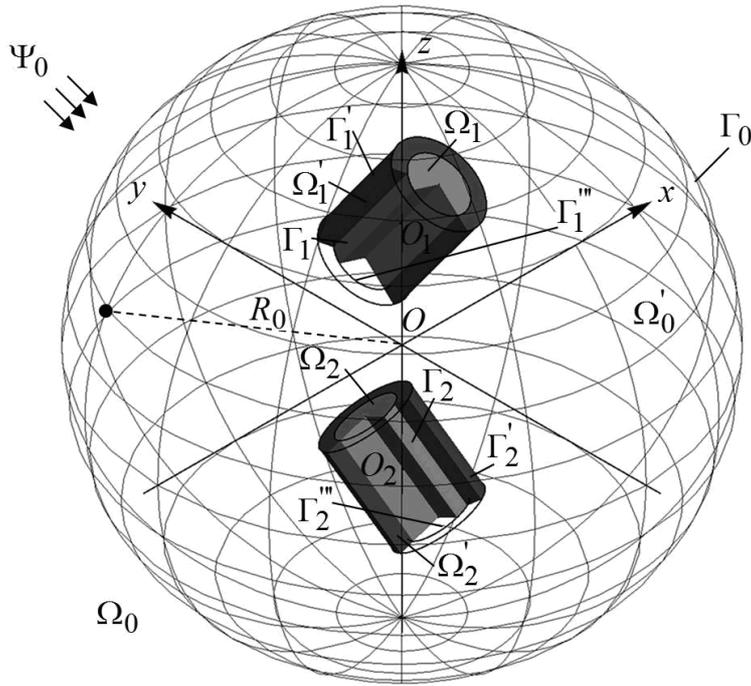


Рис. 4. Геометрия задачи с учетом области Ω

Тогда совокупность областей жидкой и упругих сред $\Omega = \Omega_0 \cup \Omega_1 \cup \Omega_1' \cup \Omega_2 \cup \Omega_2'$ можно рассматривать как некоторое неоднородное сферическое препятствие для падающей волны Ψ_0 (см. рис. 4).

Решение уравнений движения во всей области такого неоднородного препятствия будем выполнять с помощью МКЭ. Для этого, к уравнениям вида (7), (8) для упругих областей $\Omega_1, \Omega_1', \Omega_2$ и Ω_2' необходимо добавить уравнения, описывающие колебания жидкости в Ω_0' . Введем новую переменную – потенциал смещений в Ω_0' – Ψ . Поскольку в Ω_0' находится та же жидкость, что и в целом Ω_0 , то Ψ должен удовлетворять волновому уравнению вида (6)

$$\Delta \Psi + k_0^2 \Psi = 0. \quad (14)$$

Немного изменится вид граничных условий (10), (13) на поверхностях Γ_1'', Γ_2'' . В них необходимо заменить u_{0n} и p_0 на $\frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{n}}$ и $\rho_0 \omega^2 \Psi$.

На сферической внешней поверхности области Ω_0' надо ввести условия согласования параметров движения жидкости в Ω_0' и во внешней среде Ω_0 .

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Gamma_0} = \frac{\partial (\Psi_0 + \Psi_s)}{\partial \mathbf{n}}, \quad \Psi \Big|_{\Gamma_0} = \Psi_0 + \Psi_s, \quad (15)$$

где \mathbf{n} – орт, направленный по внешней нормали к границе Γ_0 . Первое условие (15) выражает требование равенства нормальных смещений в частицах, расположенных по обе стороны от Γ_0 , а второе – требование равенства давлений.

Разобьем все подобласти шара Ω на конечные элементы в форме тетраэдров. Иллюстрация этой процедуры представлена на рис. 5.

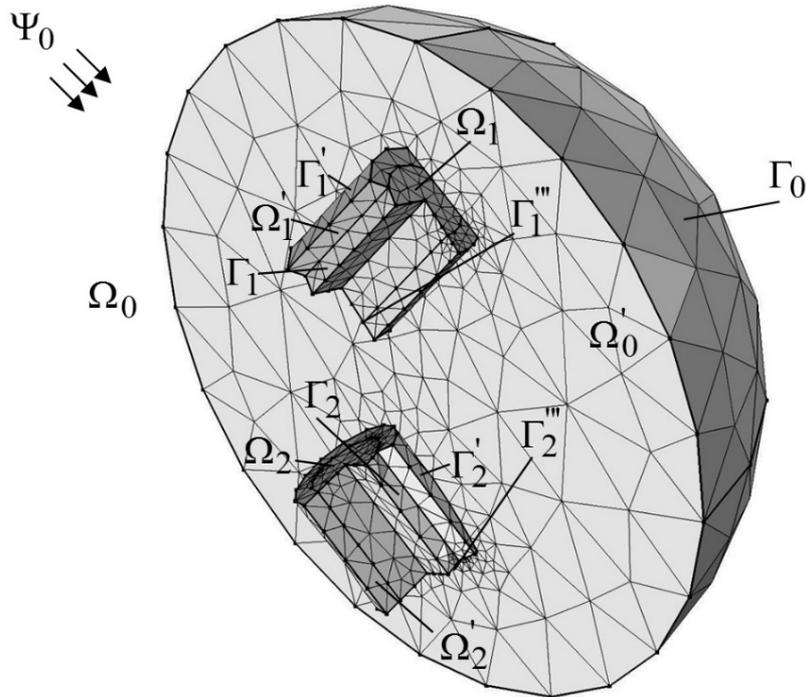


Рис. 5. Схема разбиения Ω на конечные элементы

Все неизвестные функции в Ω представляются в виде линейных комбинаций координатных функций узлов [7]. В частности для потенциала Ψ можно записать

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^K \psi_k f_k(\mathbf{r}). \quad (16)$$

В (16) ψ_k – узловые значения потенциала в области Ω ; $f_k(\mathbf{r})$ координатные функции конечно-элементной модели; K – количество узлов. Будем считать, что множество значений $k = \overline{1, K}$ охватывает узлы всей КЭ-сетки области Ω , а в узлах, не относящихся к Ω_0' , положим $\psi_k \equiv 0$.

Во внешней области содержащей жидкости потенциал смещений Ψ_s в рассеянной волне будем искать в виде разложения по сферическим гармоникам с учетом условий излучения

$$\Psi_s = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{nm} h_n(k_0 r) P_n^m(\cos \theta) e^{im\varphi}, \quad (17)$$

где $h_n(x)$ – сферическая функция Ханкеля первого рода порядка n ; $P_n^m(\cos\theta)$ – присоединенный многочлен Лежандра степени n порядка m ; r, θ, φ – координаты сферической системы координат, связанной с системой x, y, z ; A_{nm} – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению из граничных условий.

Разложим также по сферическим гармоникам и потенциал смещений в падающей плоской волне [16]

$$\Psi_0 = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \gamma_{nm} j_n(k_0 r) P_n^m(\cos\theta) e^{im\varphi}, \quad (18)$$

где $\gamma_{nm} = \frac{i^n (2n+1)(n-m)!}{(n+m)!} P_n^m(\cos\theta_0) e^{-im\varphi_0}$; $j_n(x)$ – сферическая функция Бесселя первого рода порядка n .

Подставляя (16), (17), (18) во второе граничное условие (15) и, используя ортогональность сферических гармоник, получим выражения A_{nm} через узловые значения Ψ_k на поверхности $r = R$

$$A_{nm} = \frac{1}{h_n(k_0 R)} \left[-\gamma_{nm} j_n(k_0 R) + \frac{1}{N_{nm}} \sum_{l=1}^M \Psi_l(f_l, Y_{nm}) \right], \quad (19)$$

где $N_{nm} = \frac{4\pi(n+m)!}{(2n+1)(n-m)!}$ – норма сферической гармоники

$Y_{nm} = P_n^m(\cos\theta) e^{im\varphi}$; $(f_l, Y_{nm}) = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f_l(R, \theta, \varphi) \overline{Y_{nm}(\theta, \varphi)} \sin\theta d\varphi d\theta$ – скалярное произведение на поверхности Γ_0 координатной функции $f_k(R, \theta, \varphi)$ и сферической гармоники $Y_{nm}(\theta, \varphi)$. В формуле (19) множество значений $l=1, M$ соответствует множеству узлов, расположенных на поверхности Γ_0 .

После подстановки коэффициентов (19) в формулу (17) получим зависимость потенциала смещений Ψ_s от узловых значений потенциала Ψ .

В форме, аналогичной (16), будем искать и смещение в упругой части препятствия (в областях $\Omega_1, \Omega_1', \Omega_2$ и Ω_2')

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^K \mathbf{U}_k f_k(\mathbf{r}).$$

Здесь \mathbf{u} рассматривается как общее обозначение для смещений $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}, \mathbf{u}_2$ и \mathbf{u}' , введенных выше.

В результате граничные условия (9), (10), (12), (13) и первое из (15) будут содержать в качестве неизвестных только узловые значения функций Ψ , \mathbf{u}_1 , \mathbf{u} , \mathbf{u}_2 и \mathbf{u}' из ограниченной области Ω . После этого можно решать краевую задачу для уравнений (14), (7), (8) и уравнений, аналогичных уравнениям (7) и (8) для E' , с указанными граничными условиями стандартной технологией МКЭ [7]. В результате решения находим все узловые значения неизвестных функций ψ_k , \mathbf{U}_k ($k = \overline{1, K}$). Подставляя найденные значения ψ_l ($l = \overline{1, M}$) в (19), найдем коэффициенты в разложении потенциала смещений в рассеянном поле (17).

Аналогично решим задачу о рассеянии второй падающей волны Ψ_1 и найдем коэффициенты A'_{nm} в разложении потенциала смещений в рассеянном поле, подобном (17). Тогда, потенциал смещений в рассеянном поле, полученном от действия двух волн, можно представить в виде

$$\Psi_s = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n B_{nm} h_n(k_0 r) Y_{nm}(\theta, \varphi), \quad (20)$$

где $B_{nm} = A_{nm} + A'_{nm}$.

Численные исследования

Используя асимптотическое поведение сферической функции Ханкеля при больших значениях аргумента, представим $\Psi_s(r, \theta, \varphi)$ при $r \rightarrow \infty$ из (20) в виде

$$\Psi_s|_{r \rightarrow \infty} \approx R'/(2r) \exp(ik_0 r) \Phi(\theta, \varphi),$$

где $R' = \sqrt{(R+h)^2 + (H/2)^2}$ – характерный размер исходного упругого препятствия; $\Phi(\theta, \varphi)$ – нормированная форм-функция рассеянного поля в дальней зоне, определяющая распределение амплитуды и фазы отраженной волны вдали от препятствия,

$$\Phi(\theta, \varphi) = \frac{2}{k_0 R'} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (-i)^{n+1} B_{nm} Y_{nm}(\theta, \varphi).$$

При проведении численных исследований решения анализировалось распределение по углам θ и φ амплитуды рассеянного поля, поэтому расчеты выполнялись для функции

$$F(\theta, \varphi) = \frac{2}{k_0 R'} \left| \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (-i)^{n+1} B_{nm} Y_{nm}(\theta, \varphi) \right|. \quad (21)$$

В качестве функциональных зависимостей переменных параметров упругой среды в неоднородном слое препятствия рассматривались две линейных зависимости, в которых функции зависят только от расстояния q от однородной части цилиндра (4)

$$f_1(q) = 3/2 - q/h, \quad f_2(q) = 1/2 + q/h.$$

Зависимость параметров материала неоднородного слоя от координат представлялась в виде

$$E = E_1 f(q), \quad \nu = \nu_1, \quad \rho = \rho_1 f(q),$$

где $f(q)$ – одна из функций $f_1(q)$, $f_2(q)$ или $f_0(q) \equiv 1$ (последняя предполагает постоянство значения параметра во всем слое).

Рассматривалось препятствие, однородная часть которого представляла собой цилиндр, геометрические характеристики которого подбирались для различных отношений R/H , h/H , d/H к высоте H . Расстояние d устанавливалось таким, что $d \geq R' + 1$.

Плотность и модули упругости в однородной части цилиндра заданы так: $\rho_1 = 2700 \text{ кг/м}^3$, $E_1 = 6.944 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и $\nu_1 = 53/158$.

В качестве идеальной среды, заполняющей полупространство, использовалась жидкость с плотностью $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ и скоростью звука $c_0 = 1485 \text{ м/с}$.

Волновой вектор падающей плоской волны \mathbf{k}_0 был ориентирован так, что $\theta_0 = 135^\circ$ и $\varphi_0 = 0$.

На рис. 6, 7 представлены диаграммы рассеяния для однородного цилиндра C_1 ($f(q) = f_0$), имеющего следующие геометрические характеристики: $H = 1 \text{ м}$, $R = 0.5 \text{ м}$, $h = 0.25 \text{ м}$, $d = 2 \text{ м}$. Частота падающей волны выбиралась такой, что $k_0 R' = 3.5$.

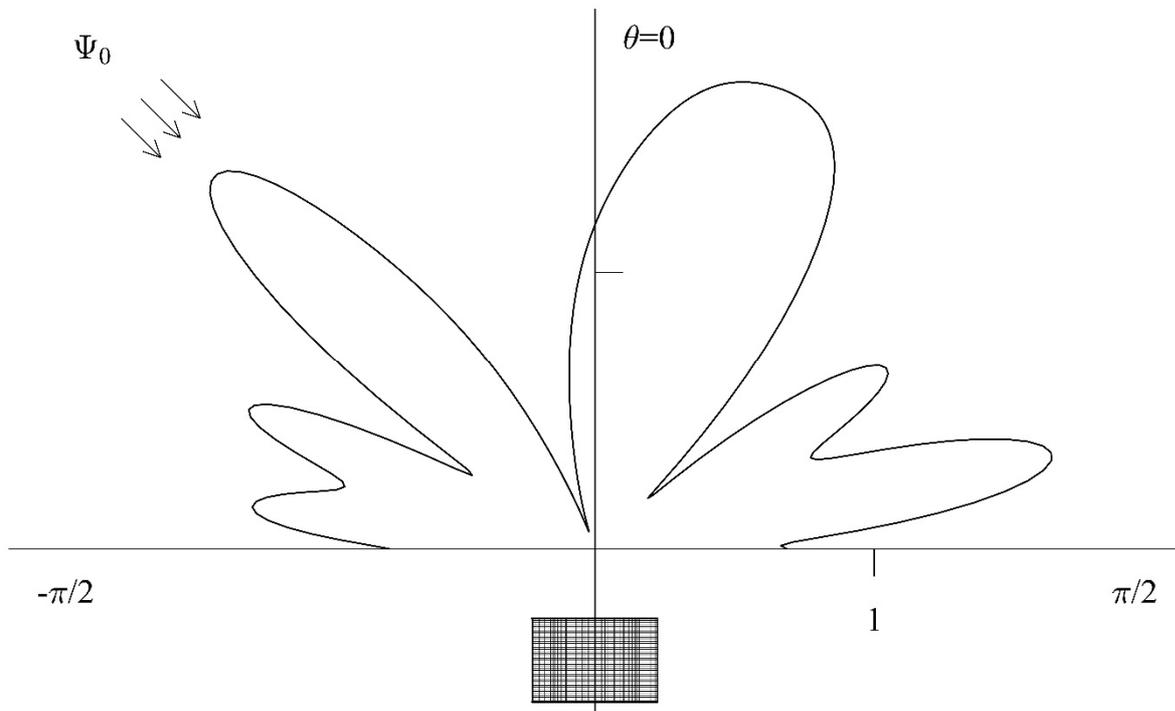


Рис. 6. Диаграмма $F(\theta, 0)$ для C_1 , углы Эйлера $[0, 0, 0]$

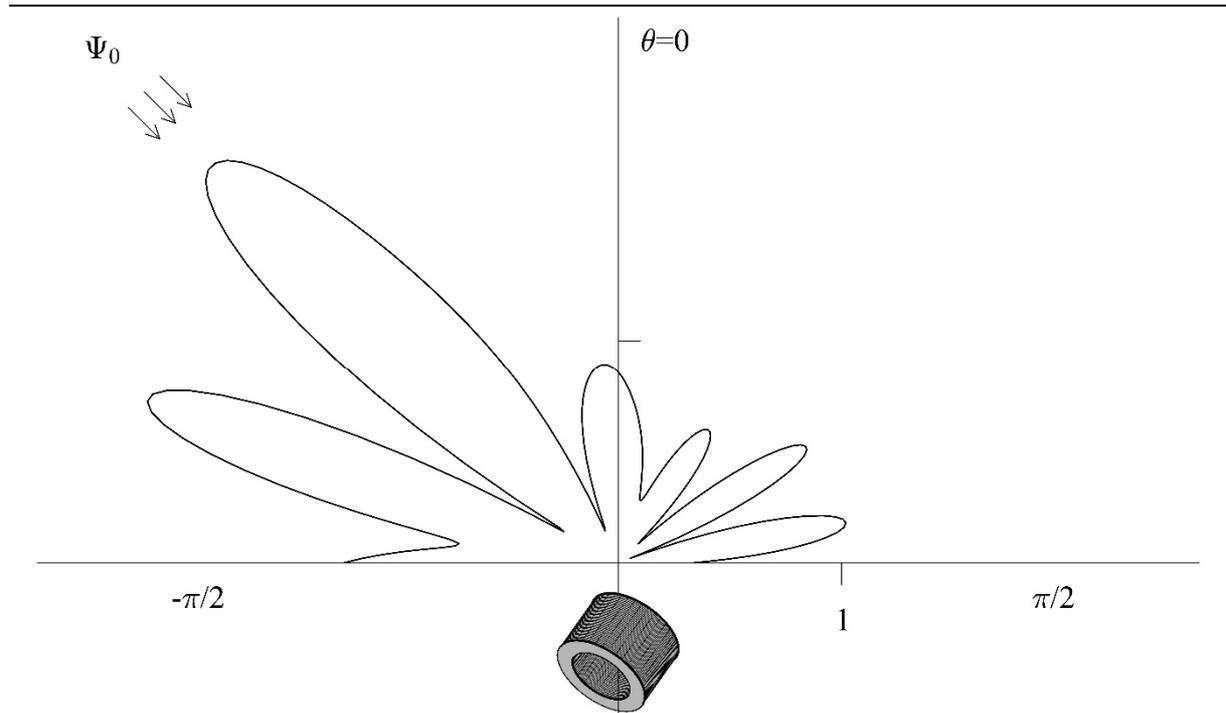


Рис. 7. Диаграмма $F(\theta, 0)$ для C_1 , углы Эйлера $[45^\circ, 45^\circ, 0]$

Ориентация цилиндра задавалась следующими углами Эйлера: $[0, 0, 0]$, $[45^\circ, 45^\circ, 0]$ (в порядке: α, β, γ). Схематично ориентация цилиндра иллюстрируется проекцией внешнего его слоя на плоскость диаграммы, изображенной в нижней части рисунка. На графиках в полуплоскости $\varphi = -\pi$ величина θ условно полагается отрицательной.

Сравнение диаграмм на рис. 6, 7 показывает существенное влияние ориентации цилиндра на рассеянное поле. При этом лепесток диаграммы направленный в сторону источника падающей волны практически не изменяется. А в других направлениях величина $F(\theta, 0)$ изменяется с коэффициентом от 1.5 до 15.

На рис. 8 – 10 представлены диаграммы рассеяния для цилиндра C_2 со следующими геометрическими параметрами: $H = R = 0.75$ м, $\delta = 0.25$ м, $d = 2.25$ м. Ориентация цилиндра задана углами Эйлера $[90^\circ, 90^\circ, 0]$. В этом случае падающая плоская волна распространяется по нормали к оси цилиндра. Предполагалось, что частота падающей волны такая, что $k_0 R' = 4$.

Рис. 8 иллюстрирует случай рассеяния волны однородным цилиндром. На рис. 9 показан случай, когда покрытие цилиндра является неоднородным с законом $f(q) = f_1(q)$. В этом случае модуль Юнга и плотность имеют максимальное значение на внешней поверхности неоднородного слоя и в 3 раза меньшее на внутренней поверхности. Для случая, представленного на рис. 10 – $f(q) = f_2(q)$ – характер изменения по толщине внешнего слоя цилиндра для плотности и модуля Юнга – обратный.

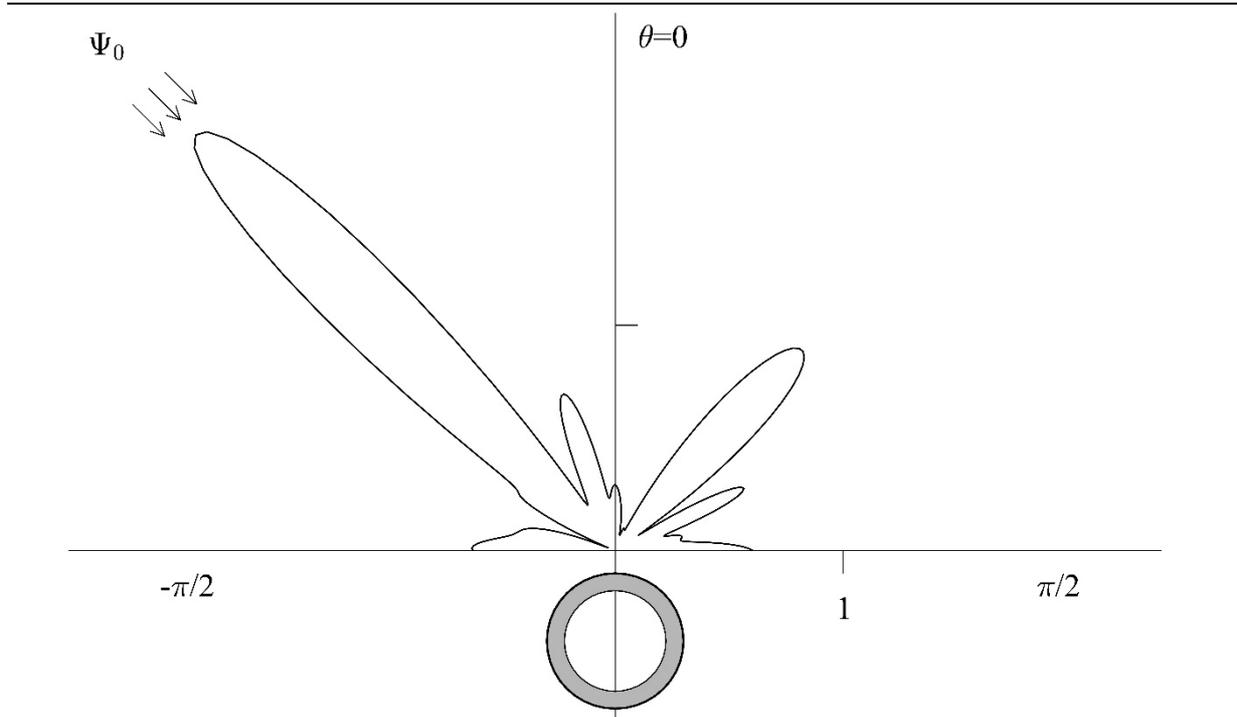


Рис. 8. Диаграмма $F(\theta, 0)$ для C_2 , $f(q) = f_0(q)$

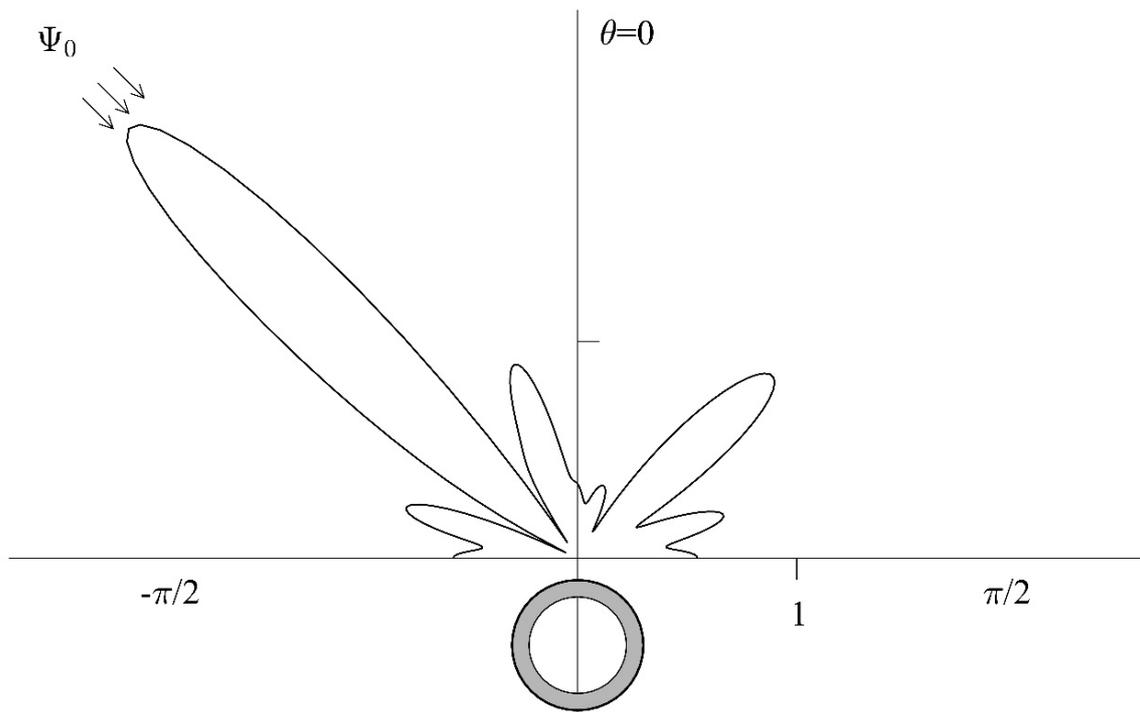


Рис. 9. Диаграмма $F(\theta, 0)$ для C_2 , $f(q) = f_1(q)$

Как видно неоднородность, как и ориентация цилиндра C_1 практически не изменяет коэффициент отражения при $\theta = -45^\circ$. А основные изменения наблюдаются в диапазонах $-90^\circ \leq \theta \leq -60^\circ$, $-20^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.

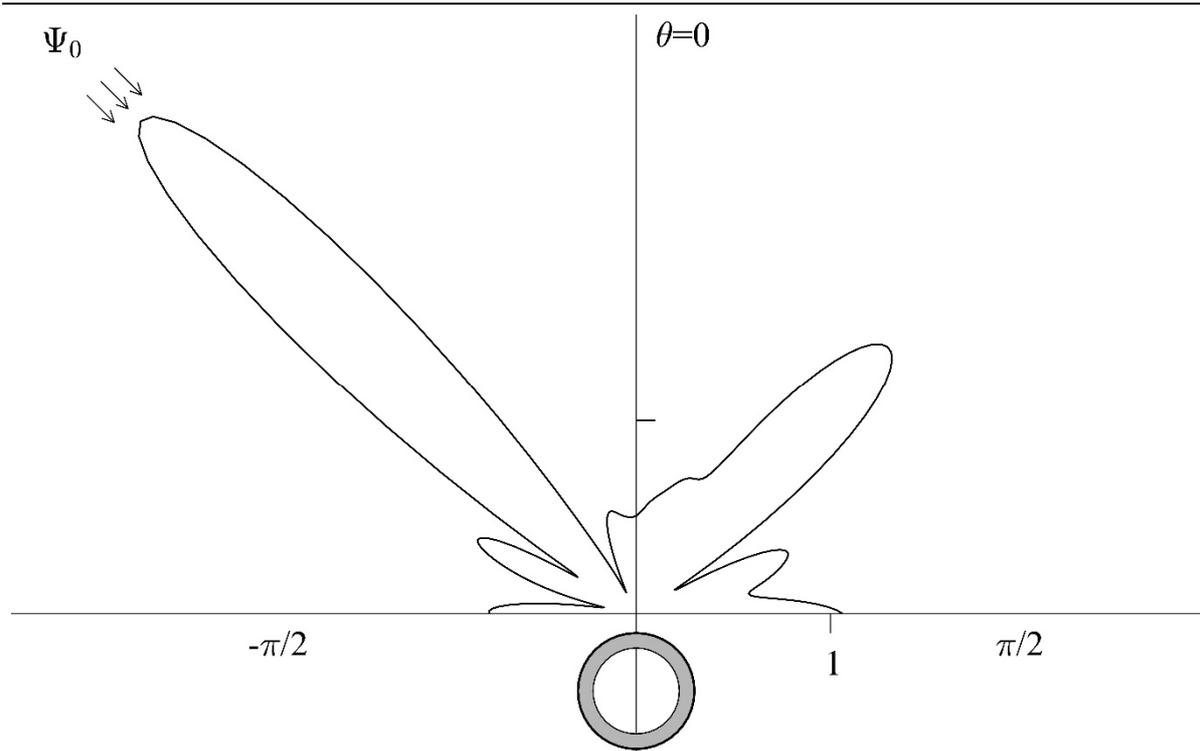


Рис. 10. Диаграмма $F(\theta, 0)$ для C_2 , $f(q) = f_2(q)$

Однако влияние неоднородности менее значительно, чем ориентация цилиндра. Например, в наибольшем лепестке теневой области неоднородность типа $f_2(q)$ приводит к изменению (увеличению) коэффициента отражения при $\theta = 45^\circ$ только 1.3 раза.

Заключение

Представленное решение показывает эффективность использования метода конечных элементов для решения задач о рассеянии звука при достаточно сложных конфигурациях упругих рассеивающих объектов. Он позволяет представить решение неким однотипным алгоритмом, который сохраняет свою структуру при широком диапазоне изменения параметров задачи.

Проведенные вычисления показывают возможность его использования для анализа трехмерных задач дифракции звука даже без использования специализированных вычислительных средств.

Полученные результаты показывают, что при рассмотренных частотах звука геометрические характеристики задачи оказывают значительно большее влияние на характер рассеянного поля, чем неоднородность материала препятствия. Но при определенных сочетаниях зависимостей в изменении параметров в диаграмме рассеяния есть заметные изменения. Следует ожидать, что повышение частоты падающей волны приведет к более выраженным изменениям форм-функции рассеяния при смене зависимостей в неоднородном покрытии цилиндра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 18-11-00199).

Список литературы

1. Ларин Н.В. Рассеяние плоской звуковой волны однородным термоупругим сплошным цилиндром // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 7. Ч. 2. С. 191 – 202.
2. Лямшев Л.М. Рассеяние звука упругими цилиндрами // Акустический журнал. 1959. Т. 5. Вып. 1. С. 58 – 63.
3. Толоконников Л.А. Рассеяние наклонно падающей плоской звуковой волны упругим цилиндром с неоднородным покрытием // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. Вып. 2. Ч. 2. С. 265 – 274.
4. Толоконников Л.А. Дифракция цилиндрических звуковых волн на цилиндре с неоднородным упругим покрытием // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. Вып. 3. С. 202 – 208.
5. Harari I., Hughes T.J.R. Finite element method for the Helmholtz equation in an exterior domain: model problems // Comp. Methods Appl. Mech. Eng. 1991. V. 87. P. 59-96.
6. Gan H., Levin P. L., Ludwig R. Finite element formulation of acoustic scattering phenomena with absorbing boundary condition in the frequency domain // J. Acoust. Soc. Am. 1993. V. 94. № 3, Pt. 1, P. 1651-1662.
7. Ihlenburg F. Finite element analysis of acoustic scattering. New York: Springer Publishing Company Inc., 2013. 226 p.
8. Иванов В.И., Скобельцын С.А. Моделирование решений задач акустики с использованием МКЭ // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2008. Вып. 2. С. 132-145.
9. Толоконников Л.А., Логвинова А.Л. Дифракция плоской звуковой волны на двух неоднородных цилиндрах с жесткими включениями // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 1. С. 54-66.
10. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
11. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
12. Скобельцын С.А., Толоконников Л.А. Дифракция плоской звуковой волны на упругом сфероиде с неоднородным покрытием в присутствии подстилающей поверхности // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 2. С. 64-75.
13. Клещев А.А. Рассеяние звука сфероидальными телами, находящимися у границы раздела сред // Акуст. журн. 1977. Т. 23, Вып. 3. С. 404-410.

14. Скобельцын С.А. Подход к решению задач о рассеянии упругих волн с использованием МКЭ // Тезисы доклада международной научной конференции “Современные проблемы математики, механики, информатики” Тула: ТулГУ. 2004. С. 135–136.

15. Иванов В.И., Скобельцын С.А. Моделирование решений задач акустики с использованием МКЭ // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2008. Вып. 2. С. 132-145.

16. Скучик Е. Основы акустики. Т. 2. М.: Мир, 1976. 542 с.

Скобельцын Сергей Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, skbl@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пешков Никита Юрьевич, аспирант, nikita.peshkoff@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**SOUND DIFFRACTION BY AN FINITE ELASTIC CYLINDER
WITH INHOMOGENEOUS COATING IN THE HALF-SPACE**

S.A. Skobel'tsyn, N.Y. Peshkov

The solution of the diffraction problem for a plane sound wave on a finite elastic cylinder, the side surface of which has an inhomogeneous layer, is presented. The cylinder is in a half-space filled with an ideal fluid. The boundary of the half-space is an acoustically rigid or acoustically soft surface. The solution is based on the linear theory of elasticity and the model of propagation of small vibrations in an ideal fluid using the finite element method (FEM). The results of the calculation of the directivity patterns of the scattered sound field in the far zone, which are shown the influence of the geometric and material properties of the cylinder on the diffraction of sound, are presented.

Key words: scattering of sound waves, half-space, inhomogeneous elastic cylinder, e finite element method, scattering pattern.

Skobel'tsyn Sergey Alekseevich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, skbl@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Peshkov Nikita Yurievich, postgraduate, nikita.peshkoff@yandex.ru, Russia, Tula, Tula, Tula State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНОСТОРОННЕГО ТОНКОГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН В ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ

Аунг Чжо Тху, А.В. Бабайцев, О.В. Егорова,
М.И. Мартиросов, Л.Н. Рабинский

В работе исследовалось влияние одностороннего порошкового полимерного покрытия на эпоксидно-полиэфирной основе на механические свойства пластин, изготовленных из листовой прокатной стали. Рассматривалось влияние покрытия толщиной порядка 100 мкм на механические свойства образцов (пластин) толщиной 0,6, 0,8 и 1 мм. Влияние одностороннего покрытия на механические свойства определялось с помощью испытаний на изгиб при комнатной температуре. Проведенные испытания показали, что тонкие покрытия незначительно влияют на механические свойства пластин в испытаниях на изгиб. Исследования были подтверждены численным моделированием в программном комплексе Ansys.

Ключевые слова: О8ПС, стальные пластины, полимерные покрытия, механические свойства, испытания на изгиб, остаточные напряжения.

1. Введение

На сегодняшний день покрытия применяются почти в любой области техники. Основной причиной использования защитных покрытий является защита элементов конструкций от коррозии, для обеспечения электрической изоляции и для декоративных целей и т.д. [1]. Для обеспечения прочности и износостойкости в процессе эксплуатации исследуются механические свойства покрытий нанесенных с использованием различных технологических процессов и материалов [1, 2]. Определение модуля упругости, прочности и других механических свойств покрытий может проводиться методами микро/наноиндентирования [3-7] или при испытаниях образцов с покрытиями на изгиб [6-7] с измерением остаточных деформаций на образцах с односторонним покрытием [8-10], при проведении прямых испытаний тонких пленок-покрытий [9], или путем исследования характера коробления покрытий на податливых подложках и т.д. Ранее были проведены ряд исследований для определения влияния порошкового покрытия на металлические образцы [14-16]. Однако все подобные испытания проводились сугубо на трехслойной структуре, где средний слой была стальная пластинка, а остальные слои нанесенным покрытием.

С учетом данных механических свойств покрытий возможно оценить их прочность и долговечность, учитывая действия внешних нагрузок при условии наличия остаточных напряжений, возникающих вследствие применения термообработки в технологическом процессе нанесения покрытий [10]. Также возможно оценить влияние покрытий на механическое поведение защищаемых тонкостенных конструкций. При проведении

прочностных расчетов крупногабаритных конструкций влиянием покрытий зачастую можно пренебрегать, если толщина стенок изделий значительно превышает толщину покрытий и жесткость покрытий намного ниже жесткости материала конструкции. Однако, очевидно, что если толщина покрытия сопоставима с толщиной элемента конструкции и если покрытия обладают достаточной жесткостью, то их влиянием при определенных вариантах нагружения пренебречь нельзя.

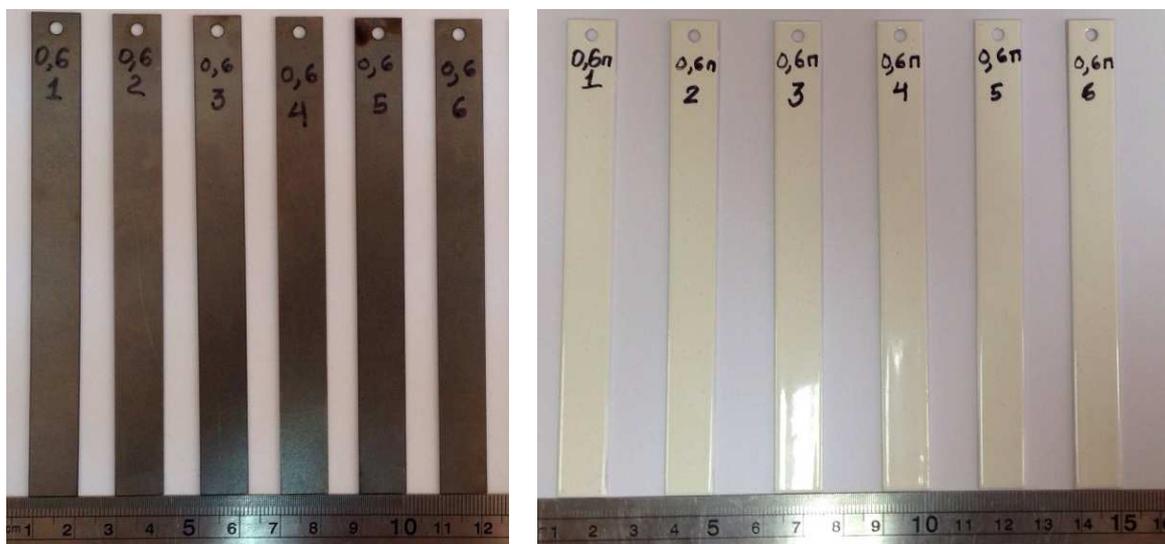
При прочностных расчетов тонкостенных металлических конструкций и их элементов с нанесенными на них защитными покрытиями, структура может иметь вид двух- или трехслойной пластины (в зависимости от того, с одной или с двух сторон нанесено покрытие) с более жестким слоем из металла и значительно более податливыми внешними слоями-покрытиями [10]. На данный момент крайне мало подобных теоретических и экспериментальных работы, в которых проведен анализ макроскопического механического поведения подобного рода учитывающий эффектов влияния остаточных напряжений. Можно отметить большое разнообразие работ в области исследования функционально-градиентных тонкостенных конструкций с покрытиями (см., например, [11, 12] и ссылки в этих работах). Однако, в таких структурах обычно подразумевается, что жесткость поверхностных слоев выше, по сравнению с внутренней областью [11, 12]. В линейных задачах статики, как показывают эксперименты, влиянием тонких покрытий можно пренебрегать. Однако, в более специфических задачах (например, в условиях конечных деформаций, нелинейной упругости) пренебрежение влиянием тонких покрытий может приводить к существенным погрешностям расчетов. Существенные эффекты, связанные с влиянием тонких полимерных покрытий на напряженно-деформированное состояние металлических тонкостенных конструкций, могут проявляться в испытаниях на изгиб и могут быть связаны с действием остаточных напряжений. Исследованию данного вопроса на примере испытания стальных пластин с тонкими полимерными односторонними покрытиями посвящена настоящая работа.

2. Методика экспериментальных исследований

В работе исследовались пластины прямоугольной формы длиной 120 мм, шириной 12 мм и толщиной 0.6 мм, 0.8 мм, 1 мм (Рис.1), вырезанные из листовой прокатной стали марки 08ПС. После обезжиривания и фосфатирования на образцы с одной стороны электростатическим способом наносилось порошковое покрытие на эпоксидно-полиэфирной основе марки EUROPOLVERI (Италия). Сушка осуществлялась при температуре 120 °С в течение не более 5 минут. Полимеризация напыленного слоя проводилась в термокамере при температуре 150 °С в течение 30 мин. Образцы охлаждались на воздухе в течение нескольких часов. Толщина покрытий на образцах составила порядка 100 мкм с разбросом значений ± 20 мкм.

Толщина каждого образца в трех сечениях контролировалась микрометром. Каждой толщине соответствовала партия с покрытием и без, по шесть образцов в каждой соответственно. Всего было 36 образцов.

Механические испытания проводились на установке Instron 5969 (Великобритания) с программным обеспечением Bluehill 3. В испытаниях на трехточечный изгиб расстояние между опорами составляло 100 мм. Скорость испытания составляла 1 мм/мин. Все испытания проводились при комнатной температуре. Для точного измерения перемещений пластины при изгибе использовался контактный экстензометр с базой 50 мм, который закреплялся на дефлектометре, установленном по центру под изгибаемым образцом.



а

б

Рис. 1. Партии образцов в виде стальных пластин без покрытий (а) и с порошковым эпоксидно-полиэфирным покрытием (б).

Испытания на изгиб проводились до максимальных деформаций на растянутых волокнах 0,1%. В результате испытаний на изгиб определялся модуль упругости. Программа автоматически выбирала наиболее характерный интервал на диаграмме напряжения-деформации для определения модуля упругости образцов.

3. Результаты

По результатам испытаний на изгиб были получены характерные диаграммы нагрузка-перемещение, для каждой партии образцов с покрытиями и без покрытий. Для каждой партии была получена результирующая диаграмма, в результате осреднения экспериментальных данных для шести однотипных образцов, пример для партии с толщиной 0,6 без покрытия представлен на рис. 2.

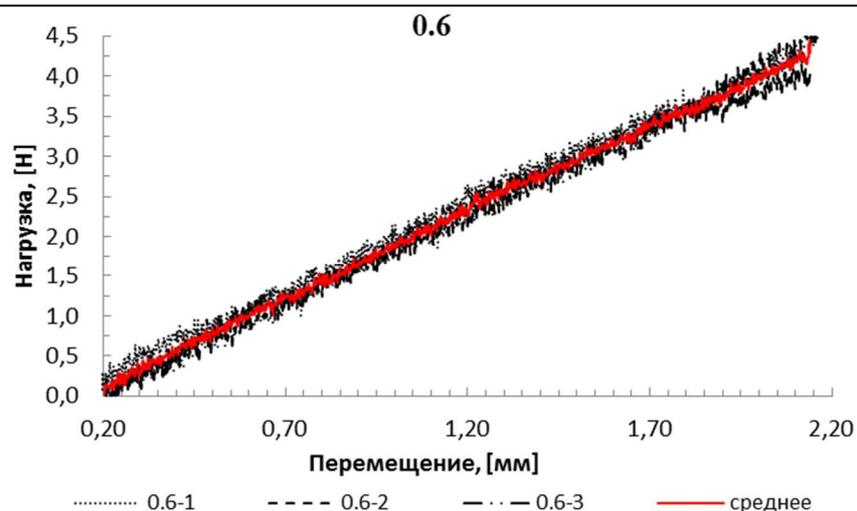


Рис. 2. Результирующая диаграмма и диаграмма зависимости прогибов от приложенной нагрузки, полученные при испытании на трехточечный изгиб пластин с толщиной стальной подложки 0,6 мм без покрытий

Результирующая диаграмма для каждой партии образцов с покрытиями и без покрытий даны на рис. 3.

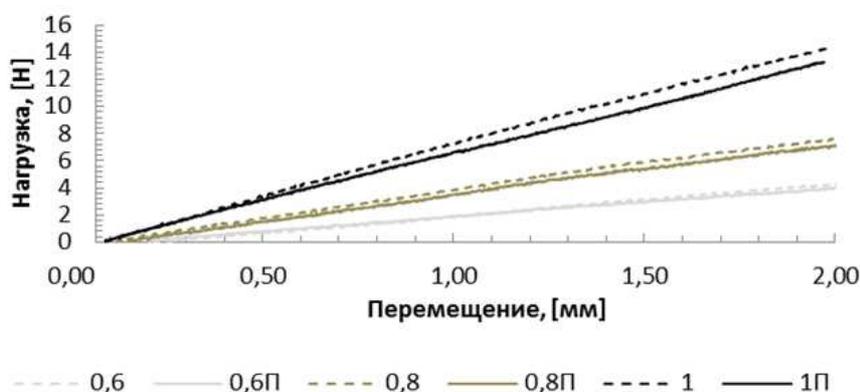


Рис. 3. Диаграммы зависимости прогибов от приложенной нагрузки, полученные при испытании на трехточечный изгиб пластин с различной толщиной стальной подложки с покрытиями и без покрытий (Где буква П обозначает партию образцов с покрытием, например 0,6 – партия образцов с толщиной 0,6 мм без покрытия, а 0,6П - партия образцов с толщиной 0,6 мм без покрытия, и. т. п.)

Результирующие диаграммы зависимости напряжений от деформации для каждой партии образцов с покрытиями и без покрытий даны на рис. 4.

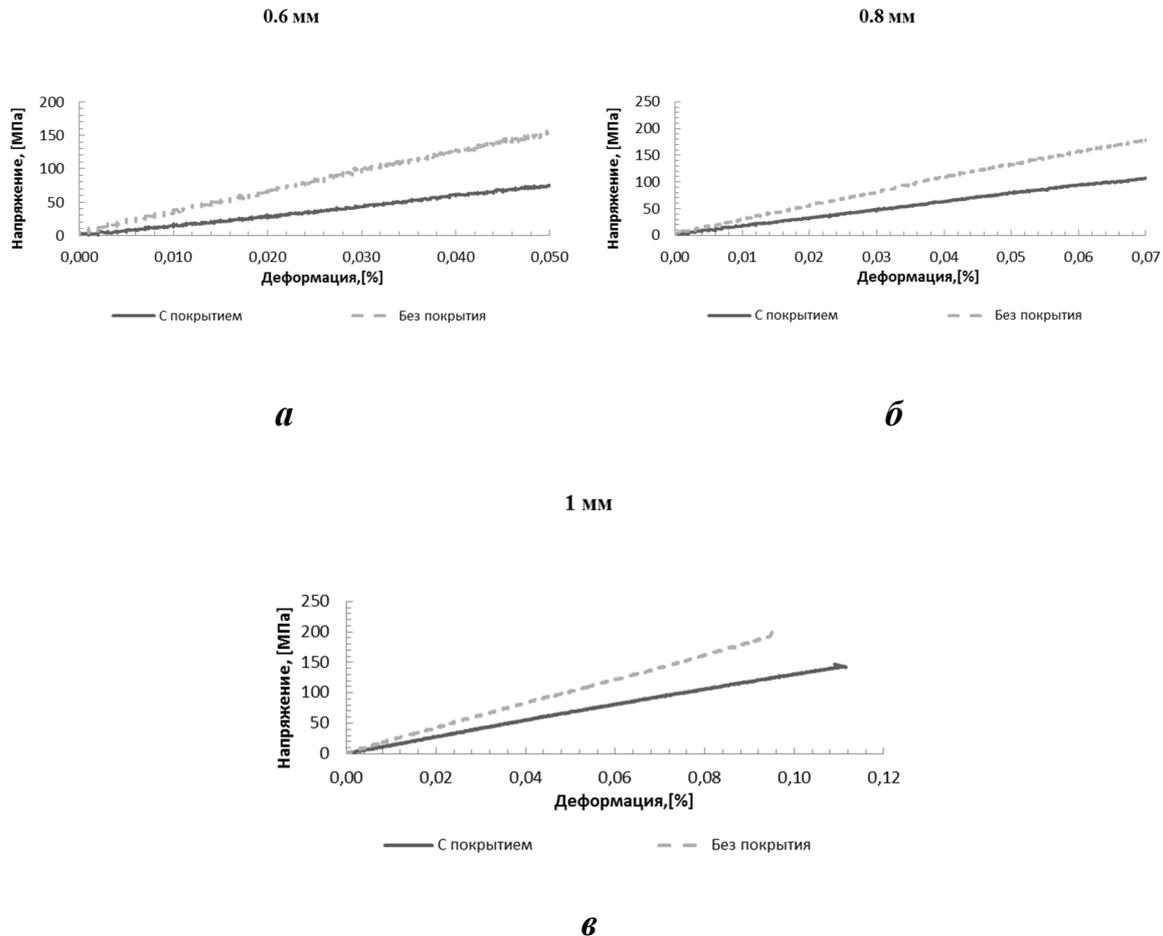


Рис. 4. Диаграммы напряжения-деформации, полученные при испытании на изгиб образцов с подложками толщиной 0,6 мм (а), 0,8 мм (б), 1 мм (в) с покрытиями и без покрытий

Из полученных результатов видно, что жесткость пластин (наклон диаграмм) незначительно изменяется при наличии на них покрытий. Однако, если пересчитывать модуль упругости пластин по результатам этих испытаний, то для образцов с покрытиями он всегда будет оказываться ниже, по сравнению с образцами без покрытий, вследствие их увеличенной толщины, определяемой с учетом наличия покрытий. При условии высокоточного измерения прогибов пластин и нагрузки данный тип испытаний может быть использован для идентификации модуля упругости покрытий [6-8]. В частности, в работе [8] для исследуемых покрытий было найдено значение модуля Юнга, которое составило, порядка 3 ГПа. Однако, с точки зрения расчета напряженно-деформированного состояния конструкций, установленное несущественное влияние покрытий в большинстве случаев можно пренебрегать.

Полученный экспериментальный результат хорошо согласуется с численным моделированием в программном комплексе Ansys. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

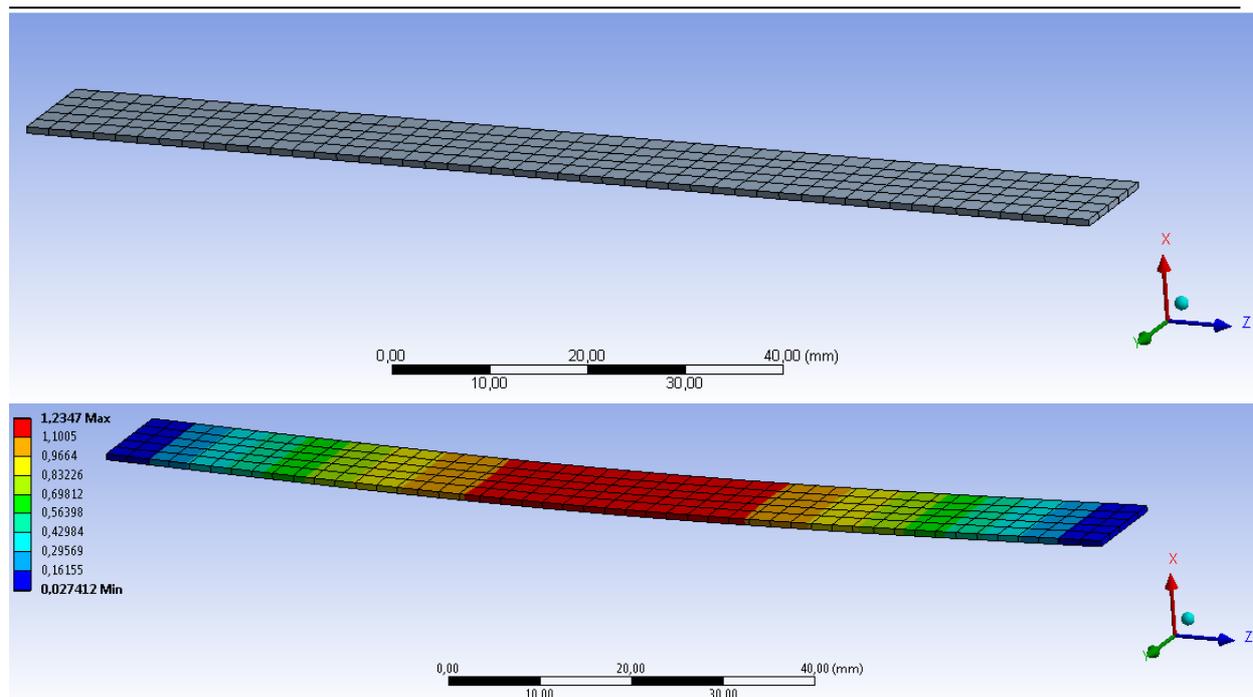


Рис. 5. Конечно-элементная модель представительного фрагмента образца с покрытием и его напряженно-деформированное состояние

Значения модуля упругости полученный в результате эксперимента не показал наличие остаточных напряжений в образцах. Из за недостатка упругости подложки в сравнении с толщиной полимерного покрытия. Однако полученный результат хорошо согласовывается с численным решением. Поэтому используя данную модель можно с достаточной точностью спрогнозировать наличие остаточных напряжений для последующих исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-01-00641.

Список литературы

1. Wicks Jr, Z. W., Jones, F. N., Pappas, S. P., Wicks, D. A. Organic coatings: science and technology. John Wiley & Sons. 2007. 656 с.
2. Санжаровский А. Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий. 1978.
3. Bull S. J. Nanoindentation of coatings //Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Т. 38. №. 24. С. R393.
4. Getmanov A.G. et al. Experimental investigations of mechanical characteristics of powder coatings on an epoxy-polyester substrate by nanoindentation // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. 2015. Т. 6. №. 3.

5. Гаврилов Д.Г., Корнев Ю.В., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Наноиндентирование порошковых лакокрасочных покрытий, наносимых на металлические поверхности // Вестник Московского авиационного института, 2011. Т. 18. № 1.

6. Zhou T., Nie P., Lv H., Chen Q., Cai X. Assessment of elastic properties of coatings by three-point bending and nanoindentation. *Journal of Coatings Technology Research*, 2011, 8(3), 355–361.

7. Ang A.S. M., Berndt C.C. A review of testing methods for thermal spray coatings. *International Materials Reviews*, 2014. 59(4), 179–223.

8. Соляев Ю.О., Лурье С.А., Рабинский Л.Н., Мартиросов М.И., Бабайцев А.В. Экспериментально-теоретическое исследование влияния полимерных порошковых покрытий на механические свойства стальных пластин. *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2015. Т. 21. № 2. С. 197-205.

9. ГОСТ 14243-78. Материалы лакокрасочные. Методы получения свободных пленок.

10. Корягин С.И. Определение напряжений в основном листе трехслойной конструкции при изгибе и растяжении. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки*. 2014. № 10. С. 35-42.

11. Birman, V., Byrd, L. W. (2007). Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures. *Applied Mechanics Reviews*, 60(5), 195.

12. Jha, D. K., Kant, T., & Singh, R. K. (2013). A critical review of recent research on functionally graded plates. *Composite Structures*, 96, 833–849.

13. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т.1. М.; Наука, 1965, 364 с.

14. Гетманов А.Г., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Исследование влияния тонких полимерных покрытий на механические свойства стальных пластин в испытаниях на растяжение, изгиб и устойчивость. *Технология металлов*, № 5, 2017. С. 12-19.

15. Berezovskii V.V., Shavnev A.A., Babaitsev A.V., et.c.. Mechanical properties of a metallic composite material based on an aluminum alloy reinforced by dispersed silicon carbide particles. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015. № 10. P. 790-794.

16. Ю.О. Соляев, С.А. Лурье, А.В. Бабайцев, и др. Исследование механических характеристик металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава, армированного дисперсными частицами карбида кремния. *Деформации и разрушение материалов*. 2014. №12. С. 12 - 16.

Аунг Чжо Тху, аспирант, janus_olga@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт,

Бабайцев Арсений Владимирович, аспирант, м.н.с., Ar7eny-f_i@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),

Егорова Ольга Владимировна, канд. физ.-мат. наук, доцент, janus_olga@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),

Мартirosов Михаил Иванович, канд. техн. наук, доцент, martirosova@ultranet.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),

Рабинский Лев Наумович, д-р физ.-мат. наук, профессор, декан, f9_dec@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF A ONE-SIDED THIN POLYMER COATING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL PLATES IN BEND TESTS

Aung Thu, A.V. Babaytsev, O.V. Egorova, M.I. Martirosov, L.N. Rabinskiy

The effect of a one-sided powder polymer coating on an epoxy-polyester base on the mechanical properties of plates manufactured from rolled sheet steel was investigated. The influence of a coating thickness of about 100 μm on the mechanical properties of samples (plates) 0.6, 0.8 and 1 mm thick was considered. The effect of a one-sided coating on mechanical properties was determined by bending tests at room temperature. The tests carried out showed that thin coatings slightly affect the mechanical properties of the plates in bend tests. The studies were confirmed by numerical modeling in the software complex Ansys.

Key words: 08PS, steel plates, polymer coatings, mechanical properties, bending tests, residual stresses.

Aung Chjo Thu, postgraduate, janus_olga@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation institute (National Research University),

Babaytsev Arsenij Vladimirovich, postgraduate, junior researcher, Ar7eny-f_i@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation institute (National Research University),

Egorova Olga Vladimirovna, candidate of physical and mathematical sciences, docent, janus_olga@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation institute (National Research University),

Martirosov Mikhail Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, martirosova@ultranet.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Rabinskiy Lev Naumovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, dean of faculty, f9_dec@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

РАССЕЯНИЕ ЗВУКА НЕОДНОРОДНЫМ УПРУГИМ ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ЦИЛИНДРОМ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

С.А. Скобельцын, Н.Ю. Пешков

Представлено решение задачи дифракции плоской звуковой волны на неоднородном упругом эллиптическом цилиндре, находящимся в идеальной жидкости, граничащей с упругим полупространством. Предполагается, что материальные параметры внешнего слоя цилиндра зависят от расстояния от поверхности его внутренней – однородной – части. Решение проводится в предположении малого влияния переотражения звука от упругого полупространства. Получено численно-аналитическое решение задачи с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Показано влияние геометрических параметров задачи и параметров неоднородности цилиндра на рассеянное поле в дальней зоне.

Ключевые слова: дифракция звука, гармоническая плоская волна, неоднородный упругий эллиптический цилиндр, упругое полупространство, метода конечных элементов.

В реальных условиях рассеяние звука препятствиями происходит в присутствии различных ограничивающих поверхностей. Поэтому при решении задач дифракции наряду с формой и свойствами материала основного рассеивающего объекта важно учитывать характер таких поверхностей. Решение подобных задач может быть использовано при разработке и анализе инженерных решений в области ультразвуковой диагностики и гидроакустики.

Изучению отражения звука объектами в виде эллиптического цилиндра посвящен ряд работ. В работах [1-5] решается задача о рассеянии звука эллиптическим цилиндром с идеальной поверхностью – акустически жесткой или мягкой. В работе [6] представлено решение для эллиптического цилиндра со смешанными граничными условиями. Случай дифракции на цилиндрических включениях с эллиптическим сечением, заполненных жидкостью, рассмотрен в работах [7-10]. Авторами статей [11-17] решается задача о рассеянии звуковых или упругих волн эллиптическими цилиндрами из упругого материала. Особенности формы сечения цилиндра и свойств содержащей жидкости учтены в работах [5, 18, 19]. В работах [15-17, 20, 21] решаются задачи дифракции звуковых волн на эллиптических оболочках и цилиндрах с полостями. В некоторых работах, например [15], предложено решение для случая неоднородного материала цилиндра.

В большей части работ о дифракции волн на эллиптическом цилиндре предполагается, что поверхность является идеальной или заполнитель препятствия является однородным, а процесс наблюдается в неограничен-

ном пространстве. В данной работе рассматривается случай рассеяния звука бесконечным упругим эллиптическим цилиндром с внешним неоднородным слоем, причем предполагается, что цилиндр находится в идеальной жидкости, граничащей с упругим полупространством. Геометрическая постановка задачи показана на рис. 1.

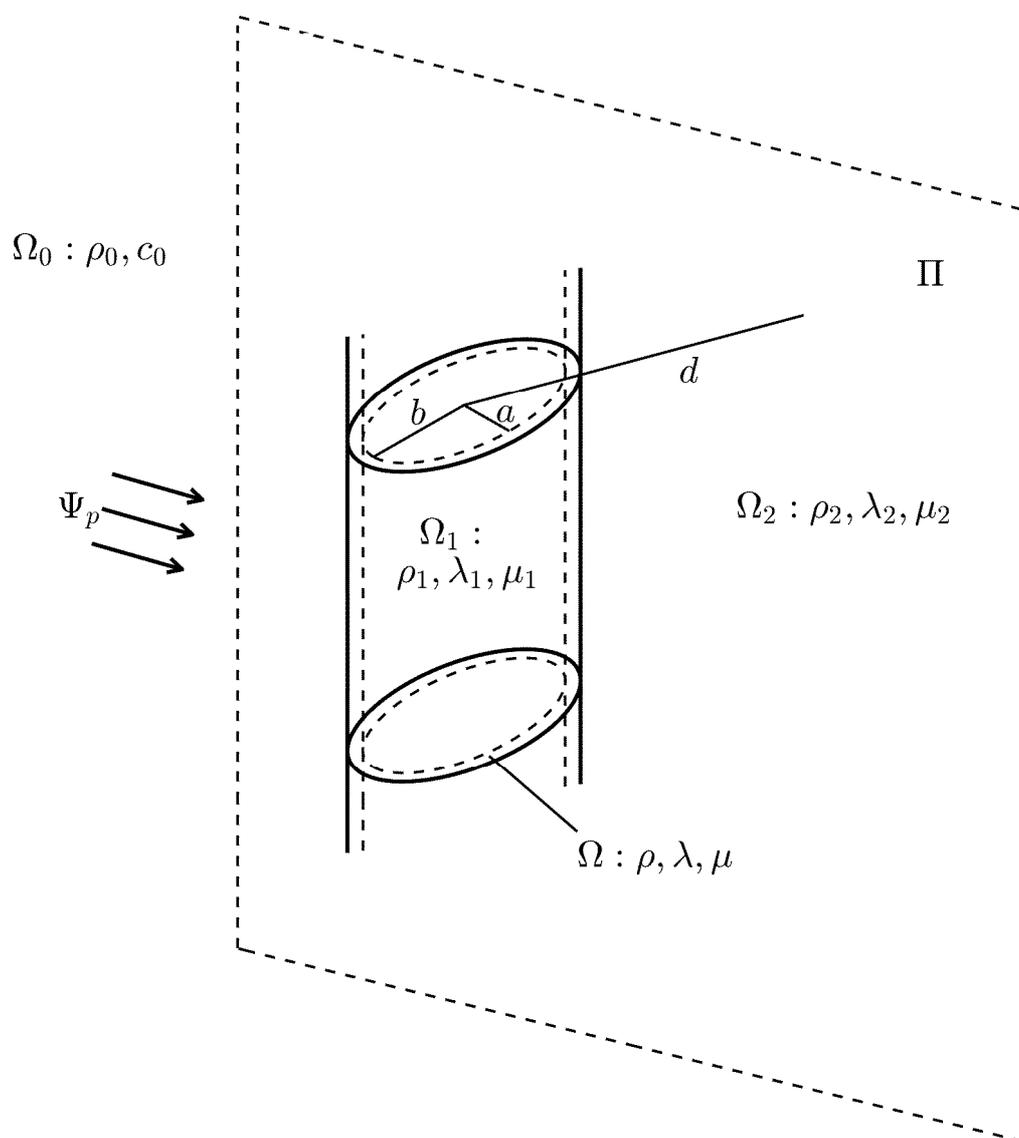


Рис. 1. Геометрия задачи

Символом Π обозначена поверхность упругого полупространства Ω_2 , которая также является границей области Ω_0 , заполненной идеальной жидкостью, имеющей плотность ρ_0 и скорость звука c_0 . Эллиптический цилиндр представлен на рисунке двумя нормальными сечениями и двумя образующими. Пунктирными линиями показаны соответствующие элементы для внутренней – однородной – части цилиндра Ω_1 . Нормальное сечение цилиндра представляет собой эллипс с полуосями a и b . Ось цилиндра и его образующие параллельны плоскости Π . Расстояние от оси

цилиндра до поверхности упругого полупространства равно d . На рисунке оно показано как длина отрезка, проведенного из центра сечения цилиндра к границе полупространств по нормали к Π .

Символом Ω обозначен внешний – неоднородный – слой цилиндра, который имеет постоянную толщину h . Заметим, что при таком введении неоднородного покрытия цилиндра сечение его внутренней поверхности является эллипсом с полуосями a и b , а сечение внешней поверхности в общем случае не является эллипсом. Плотность и модули упругости Ламе в слое Ω представляют собой заданные функции координат точки пространства: $\rho(\mathbf{r})$, $\lambda(\mathbf{r})$, $\mu(\mathbf{r})$, где \mathbf{r} – радиус-вектор. Соответствующие материальные параметры в Ω_1 и Ω_2 являются постоянными величинами и обозначены ρ_1 , λ_1 , μ_1 и ρ_2 , λ_2 , μ_2 , соответственно.

На цилиндр $\Omega \cup \Omega_1$ падает плоская гармоническая звуковая волна, потенциал скорости в которой имеет вид [22]

$$\Psi_p = \exp[i(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} - \omega t)], \quad (1)$$

где i – мнимая единица; t – время; ω – круговая частота; \mathbf{k}_0 – волновой вектор, направление которого, определяет направление распространения волны, а длина $|\mathbf{k}_0| = k_0 = \omega/c_0$ – волновое число. Без ограничения общности полагается, что $|\Psi_p| = 1$. Далее у величин, зависящих от времени, множитель $\exp(-i\omega t)$ будем, как правило, опускать.

При условии, что \mathbf{k}_0 , геометрические характеристики a , b , h , d , а также материальные параметры сред заданы, требуется определить рассеянное звуковое поле вне цилиндра и поле упругих колебаний в области $\Omega \cup \Omega_1$. Решение будем искать на основе моделей линейной теории упругости и идеальной жидкости [22, 23].

Предположим, что $d \gg \max(a, b) + h$, тогда действием волн, которые получаются в результате отражения от поверхности Π волн, отраженных цилиндром (т. н., переотраженных волн) можно пренебречь. В этих условиях совокупность волновых полей в рассматриваемой задаче может быть представлена набором функций, представленных на рис. 2.

В процессе отражения первичной волны Ψ_p упругим полупространством в каждой точке M поверхности Π в общем случае формируются три плоские волны. В акустической среде Ω_0 : отраженная звуковая – Ψ_q ; в упругой среде Ω_2 : прошедшие продольная – Ψ_2 и поперечная – Φ_2 . Полагается, что Ψ_q – потенциал скорости; Ψ_2 , Φ_2 – потенциалы смещения [23]. Тогда поле смещений в упругом полупространстве Ω_2 будет представлено вектором

$$\mathbf{u}_2 = \text{grad } \Psi_2 + \text{rot } \Phi_2. \quad (2)$$

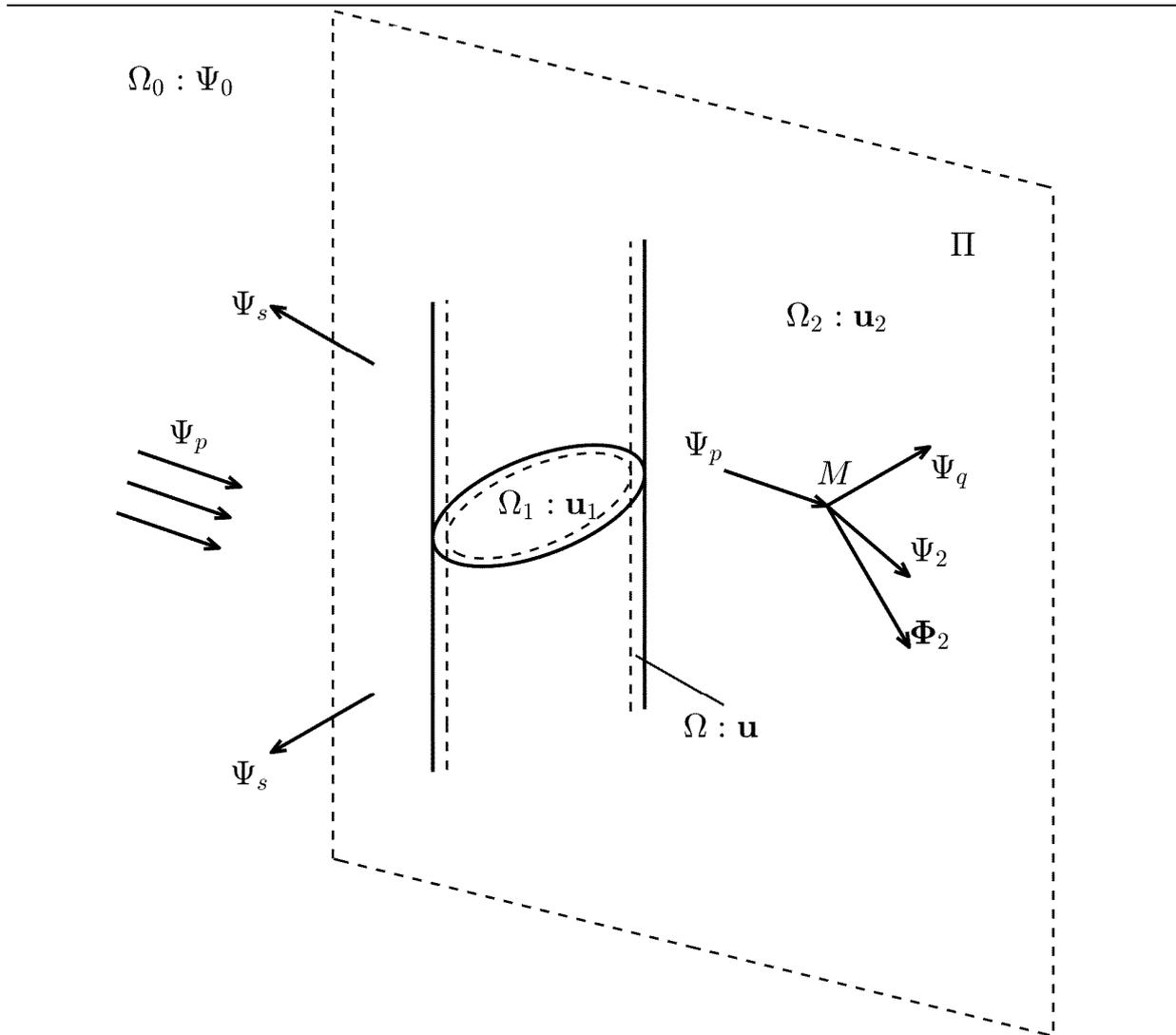


Рис. 2. Волновые поля

Под действием первичной волны Ψ_p и отраженной от поверхности Π вторичной Ψ_q звуковых волн в цилиндре формируются поля упругих колебаний, которые будем представлять векторами смещений частиц среды: \mathbf{u}_1 – в однородной части и \mathbf{u} – в неоднородном покрытии. Взаимодействие звуковых полей и упругих колебаний цилиндра порождает отраженное звуковое поле, которое будем также характеризовать потенциалом скорости Ψ_s . Таким образом, суммарное звуковое поле в акустической среде Ω_0 будет определяться линейной комбинацией падающей волны, волны отраженной от упругого полупространства и поля, рассеянного цилиндром

$$\Psi_0 = \Psi_p + \Psi_q + \Psi_s. \quad (3)$$

Для математической формулировки задачи введем две декартовых системы координат (рис. 3). Основную систему x, y, z с началом O введем так, чтобы поверхность упругого полупространства совпадала с коор-

динатной поверхностью $y = 0$, а ось Oz была проекцией на Π оси упругого цилиндра. Вторую систему координат x_1, y_1, z_1 с началом в точке O_1 свяжем с цилиндром так, чтобы ось O_1z_1 была направлена по оси цилиндра, а координатные линии x_1, y_1 содержали полуоси эллипса в сечении цилиндра Ω_1 так, что его поверхность Γ_1 описывается каноническим уравнением

$$x_1^2/a^2 + y_1^2/b^2 = 1. \quad (4)$$

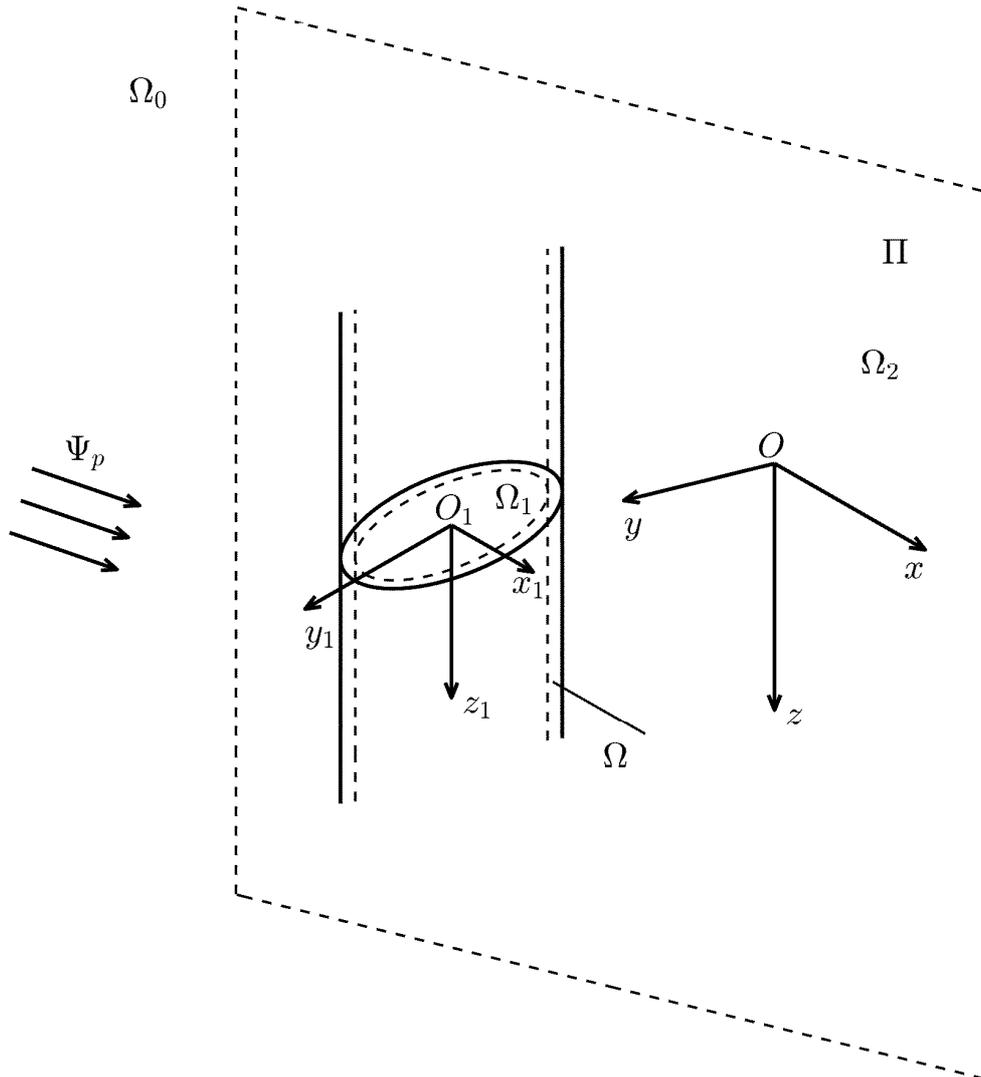


Рис. 3. Введение систем координат

Разместим точку O_1 так, чтобы ее координаты в основной системе координат были $(0, d, 0)$.

Тогда связь между координатами x, y, z и x_1, y_1, z_1 может быть представлена в виде:

$$x_1 = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \quad y_1 = -x \sin \alpha + y \cos \alpha - d, \quad z_1 = z,$$

где α – угол между осями Oy и O_1y_1 .

Если считать, что x_1, y_1 удовлетворяют (4) (лежат на поверхности Γ_1), то координаты точек внешней поверхности неоднородного слоя Γ можно получить по соотношениям

$$\Gamma: x'_1 = x_1 + hn_x, \quad y'_1 = y_1 + hn_y, \quad z'_1 = z_1, \quad (5)$$

где $n_x = x_1 b^2 e$, $n_y = y_1 a^2 e$ – компоненты единичной внешней нормали к поверхности Γ_1 , а $e = (x_1^2 b^4 + y_1^2 a^4)^{-1/2}$.

В аналогичной (5) форме в системе координат можно представить все точки области неоднородного слоя

$$\Omega: x'_1 = x_1 + qn_x, \quad y'_1 = y_1 + qn_y, \quad z'_1 = z_1, \quad (6)$$

где x_1, y_1 удовлетворяют (4); параметр q – действительное число из интервала $(0, h]$.

При указанном порядке выбора систем координат и независимости параметров неоднородного материала от координаты z задача становится "почти" двумерной, поскольку в силу закона Снеллиуса [22] зависимость всех параметров движения от координаты z будет одинаковой и такой, какой она задана в падающей волне. Если представить волновой вектор в потенциале падающей волны (1) в системе x, y, z так

$$\mathbf{k}_0 = k_0(\sin \theta_0 \cos \varphi_0, \sin \theta_0 \sin \varphi_0, \cos \theta_0),$$

(θ_0 – угол между волновым вектором и осью z , а φ_0 – угол между проекцией \mathbf{k}_0 на плоскость $z = 0$ и осью Ox),

то эта зависимость будет иметь вид $\exp(ik_{0z})$, где $k_{0z} = k_0 \cos \theta_0$ – проекция волнового вектора падающей волны на ось z .

На рис. 4 показано сечение $z = 0$ геометрии задачи. Это сечение показывает компоненты постановки задачи, характерные для любого сечения $z = \text{const}$. Падающая, отраженная и прошедшие в Ω_2 волны здесь представлены проекциями волновых векторов $\mathbf{k}_0, \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \chi_2$ соответствующих волн на плоскость xOy .

Поскольку проекции векторов $\mathbf{k}_0, \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \chi_2$ на плоскость Π должны совпадать, то векторы $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \chi_2$ имеют вид:

$$\mathbf{k}_1 = (k_{0x}, -k_0 \sin \theta_0 \sin \varphi_0, k_{0z}), \quad \mathbf{k}_2 = (k_{0x}, -k_{2y}, k_{0z}), \quad \chi_2 = (k_{0x}, -\chi_{2y}, k_{0z}),$$

где $k_{0x} = k_0 \sin \theta_0 \cos \varphi_0$ – проекция \mathbf{k}_0 на ось x ; $k_{2y} = (k_2^2 - k_{0x}^2 - k_{0z}^2)^{1/2}$;

$k_2 = \omega(\rho_2 / (\lambda_2 + 2\mu_2))^{1/2}$ – волновое число продольных волн в Ω_2 ;

$\chi_{2y} = (\chi_2^2 - k_{0x}^2 - k_{0z}^2)^{1/2}$; $\chi_2 = \omega(\rho_2 / \mu_2)^{1/2}$ – волновое число поперечных волн в Ω_2 .

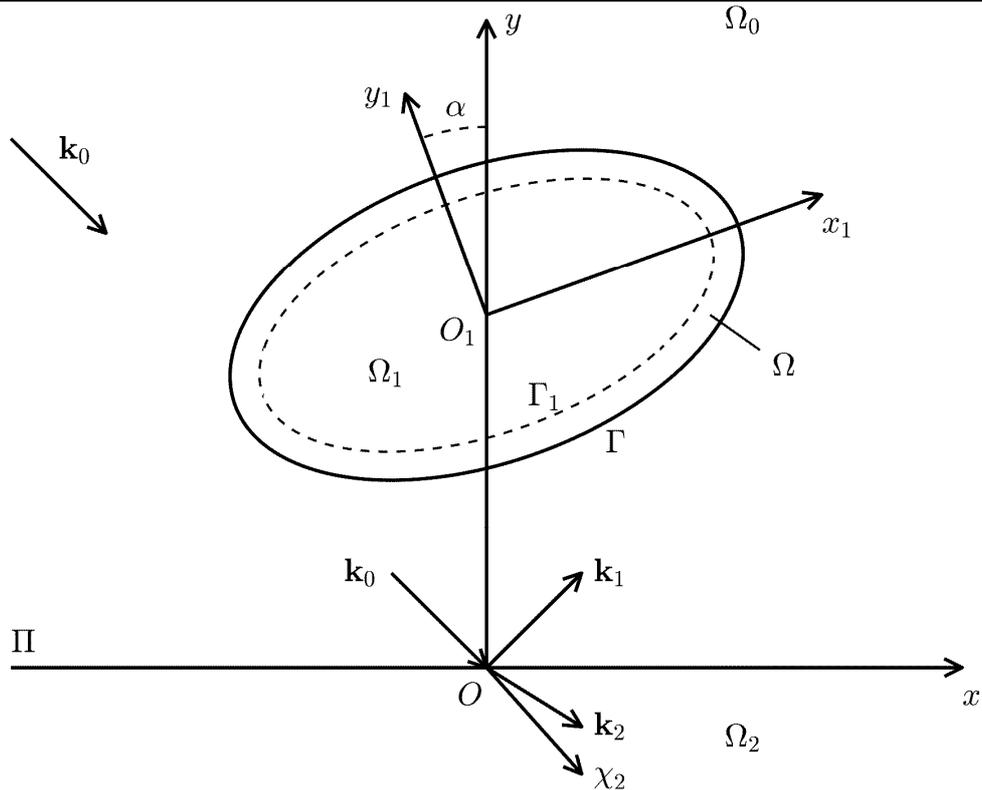


Рис. 4. Компоненты постановки задачи в сечении $z=0$

Далее рассмотрим уравнения, которым должны удовлетворять введенные неизвестные функции. Потенциалы скорости Ψ_q и Ψ_s должны удовлетворять уравнению Гельмгольца [22] в Ω_0 :

$$\Delta\Psi_q + k_0^2\Psi_q = 0, \quad \Delta\Psi_s + k_0^2\Psi_s = 0. \quad (7)$$

Потенциалы смещений в продольной и поперечной волнах в однородной упругой среде Ω_2 , определяющих смещение (2), удовлетворяют волновым уравнениям [23]:

$$\Delta\Psi_2 + k_2^2\Psi_2 = 0, \quad \Delta\Phi_2 + \chi_2^2\Phi_2 = 0. \quad (8)$$

Для описания движения в упругом цилиндре будем использовать уравнения малых гармонических колебаний в напряжениях в системе координат x, y, z [23]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} &= -\rho u_x, & \frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} &= -\rho u_y, \\ \frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} &= -\rho u_z, \end{aligned} \quad (9)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; u_i – компоненты вектора смещений.

Компоненты тензора напряжений выражаются через производные компонент вектора смещений посредством закона Гука [23]. Будем применять уравнения (9) как в области Ω по отношению к вектору \mathbf{u} , так и в области Ω_1 по отношению к вектору \mathbf{u}_1 .

На поверхностях взаимодействия идеальной жидкости и упругой среды должны выполняться условия равенства нормальных скоростей и компонент вектора напряжений. На поверхности упругого полупространства Ω_2 эти условия выражаются соотношениями:

$$y=0: -i\omega u_{2y} = \frac{\partial(\Psi_p + \Psi_q)}{\partial y}, \sigma_{2yy} = -i\omega\rho_0(\Psi_p + \Psi_q), \sigma_{2yx} = \sigma_{2yz} = 0, \quad (10)$$

где индекс 2 указывает на принадлежность компонент области Ω_2 .

Заметим, здесь фигурирует не весь потенциал скорости Ψ_0 , предполагается, что Ψ_s у поверхности Π пренебрежимо мал по сравнению с Ψ_p .

На внешней поверхности цилиндра Γ аналогичные условия формулируются в виде:

$$\mathbf{r} \in \Gamma: -i\omega u_n = \partial\Psi_0/\partial n, \sigma_{nn} = -i\omega\rho_0\Psi_0, \sigma_{n\tau} = 0, \sigma_{nz} = 0. \quad (11)$$

где u_n нормальная составляющая вектора \mathbf{u} ; σ_{nn} , $\sigma_{n\tau}$, σ_{nz} – нормальная и две касательных составляющих вектора напряжений в области Ω .

На границе взаимодействия однородной упругой среды цилиндра и внешнего неоднородного слоя потребуем непрерывности деформаций и вектора напряжений:

$$\mathbf{r} \in \Gamma_1: \mathbf{u}_1 = \mathbf{u}, \sigma_{1nn} = \sigma_{nn}, \sigma_{1n\tau} = \sigma_{n\tau}, \sigma_{1nz} = \sigma_{nz}. \quad (12)$$

Здесь величины без индекса относятся к неоднородному слою, а с индексом 1 – к области Ω_1 .

Таким образом, математически задача предполагает решение уравнений (7)-(9) с учетом граничных условий (10)-(12). Кроме того, потенциал скорости в рассеянном поле Ψ_s должен удовлетворять условиям излучения на бесконечности [22].

В соответствии со сделанными предположениями решение первого уравнения (7) и уравнений (8) с учетом граничных условий (10) может быть проведено независимо. Это – известная задача об отражении плоской звуковой волны Ψ_0 от упругого полупространства [24]. Представляя потенциалы Ψ_q , Ψ_2 , Φ_2 в виде:

$$\Psi_q = A \exp[i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t)], \Psi_2 = B \exp[i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t)], \Phi_2 = C \exp[i(\chi_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t)]$$

и используя граничные условия (10), найдем коэффициент A

$$A = \frac{d_1 + d_2}{d_1 - d_2}, \quad (13)$$

где

$$d_1 = k_{0y}k_2^2(k_{01}^2 - \chi_{2y}^2)\lambda_2 + 2k_{0y}k_{2y}(2k_{01}^2(k_{2y} - \chi_{2y}) - k_{2y}\chi_{2y}^2)\mu_2;$$

$$k_{01}^2 = k_{0x}^2 + k_{0z}^2; d_1 = k_{2y}\chi_{2y}^2\rho_0\omega^2.$$

Представим компоненты смещения в цилиндре в виде

$$u_x = u(x, y)\exp(-ik_{0z}z), u_y = v(x, y)\exp(-ik_{0z}z), u_z = w(x, y)\exp(-ik_{0z}z). \quad (14)$$

Подставляя (14) в (9), получим следующую систему уравнений относительно функций u, v, w :

$$\begin{aligned} (\xi u'_x + \lambda v'_y + g\lambda w)'_x + (\mu v'_x + \mu u'_y)'_y + g\mu(w'_x + gu) &= -\rho\omega^2 u, \\ (\mu v'_x + \mu u'_y)'_x + (\lambda u'_x + \xi v'_y + g\lambda w)'_y + g\mu(w'_y + gv) &= -\rho\omega^2 v, \\ (\mu w'_x + g\mu u)'_x + (\mu w'_y + g\mu v)'_y + g(\lambda u'_x + \lambda v'_y + g\xi w)' &= -\rho\omega^2 w, \end{aligned} \quad (15)$$

где штрих обозначает частную производную по координате, указанной в нижнем индексе; $g = -ik_{0z}$.

Решить уравнения (15) аналитически при сделанных предположениях об условиях задачи нельзя потому, что зависимости $\rho(\mathbf{r}), \lambda(\mathbf{r}), \mu(\mathbf{r})$ являются достаточно произвольными функциями координат x, y (или x_1, y_1), а поверхность Γ в общем случае не является координатной поверхностью ортогональной системы координат. Воспользуемся подходом, предложенным в работе [25], позволяющим получить численно-аналитическое решение.

Выделим в окрестности неоднородного эллиптического цилиндра слой окружающей жидкости Ω'_0 так, чтобы внешняя поверхность $\Omega'_0 - \Gamma_0$ представляла собой круговой цилиндр радиуса R с осью, совпадающей с O_1z_1 . Уравнение поверхности Γ_0 представим в виде

$$\Gamma_0: x_1^2 + x_2^2 = R^2.$$

Теперь область $\Omega' = \Omega'_0 \cup \Omega \cup \Omega_1$ будем рассматривать как неоднородное препятствие для волн Ψ_p, Ψ_q в виде кругового цилиндра. Решение уравнений движения в Ω' будем выполнять с помощью метода конечных элементов [25, 26]. Для этого в области Ω'_0 введем новую неизвестную величину Ψ – потенциал скорости движения частиц в идеальной жидкости в области Ω'_0 . Он должен удовлетворять уравнению вида (7). На границе Γ должны выполняться условия вида (11), в которых вместо Ψ_p надо использовать Ψ . На внешней границе Ω' должны выполняться условия непрерывности давления и нормальной скорости:

$$\mathbf{r} \in \Gamma_0: \Psi = \Psi_0, \partial\Psi/\partial n = \partial\Psi_0/\partial n. \quad (16)$$

Для удобства записи последующих соотношений перенесем начало основной системы координат x, y, z в точку O_1 и свяжем с ней цилиндрическую систему координат r, φ, z . Решим второе уравнение (7) в системе координат r, φ, z методом разделения переменных с учетом уже известной зависимости Ψ_s от z . Получим ряд [27]

$$\Psi_s = f(z) \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m H_m(k_1 r) \exp(im\varphi), \quad (17)$$

где A_m – пока неизвестные коэффициенты; $k_1 = (k_0^2 - k_{0z}^2)^{1/2}$; $H_m(x)$ – цилиндрическая функция Ханкеля первого рода порядка m , которая обеспечивает выполнение условий излучения на бесконечности для Ψ_s ; $f(z) = \exp(-ik_{0z}z)$.

Разложим по функциям Бесселя в форме (17) и сумму плоских волн Ψ_p, Ψ_q [27]:

$$\Psi_p + \Psi_q = f(z) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \gamma_m J_m(k_1 r) \exp(im\varphi), \quad (18)$$

где $J_m(x)$ – цилиндрическая функция Бесселя первого рода порядка m ; $\gamma_m = i^m (\exp[i(k_{0y}d - m\varphi_0)] + A \exp[i(m\varphi_0 - k_{0y}d)])$; A определяется выражением (13).

В соответствии с методом МКЭ область Ω' разбивается на конечные элементы (пример разбиения см. на рис. 5) и неизвестные функции в ней представляются в виде линейных комбинаций:

$$\Psi = f(z) \sum_{k=1}^K \psi_k f_k(x, y), \quad \mathbf{u} = f(z) \sum_{k=1}^K \mathbf{U}_k f_k(x, y), \quad (19)$$

где K – число узлов конечно-элементной сетки; k – номер узла; $f_k(x, y)$ – координатная функция узла k ; $f(z)\psi_k, f(z)\mathbf{U}_k$ значения искомого функций в узле k .

Подставим (3), (17), (18) и выражение Ψ из (19) в первое из граничных условий (16) и воспользуемся ортогональностью функций $\exp(im\varphi)$ при различных m на отрезке $[0, 2\pi]$. Получим выражение коэффициентов A_m из (17) через узловые значения потенциала Ψ на окружности Γ_0

$$A_m = \frac{1}{2\pi} \sum_{k \in K_0} \psi_k \int_0^{2\pi} f_k(R \cos \varphi, R \sin \varphi) \exp(-im\varphi) d\varphi, \quad (20)$$

где K_0 – множество номеров узлов сетки конечных элементов на Γ_0 .

Используя (20) во втором граничном условии (16), получим уравнение, которое содержит только узловые значения ψ_k ($k \in K_0$).

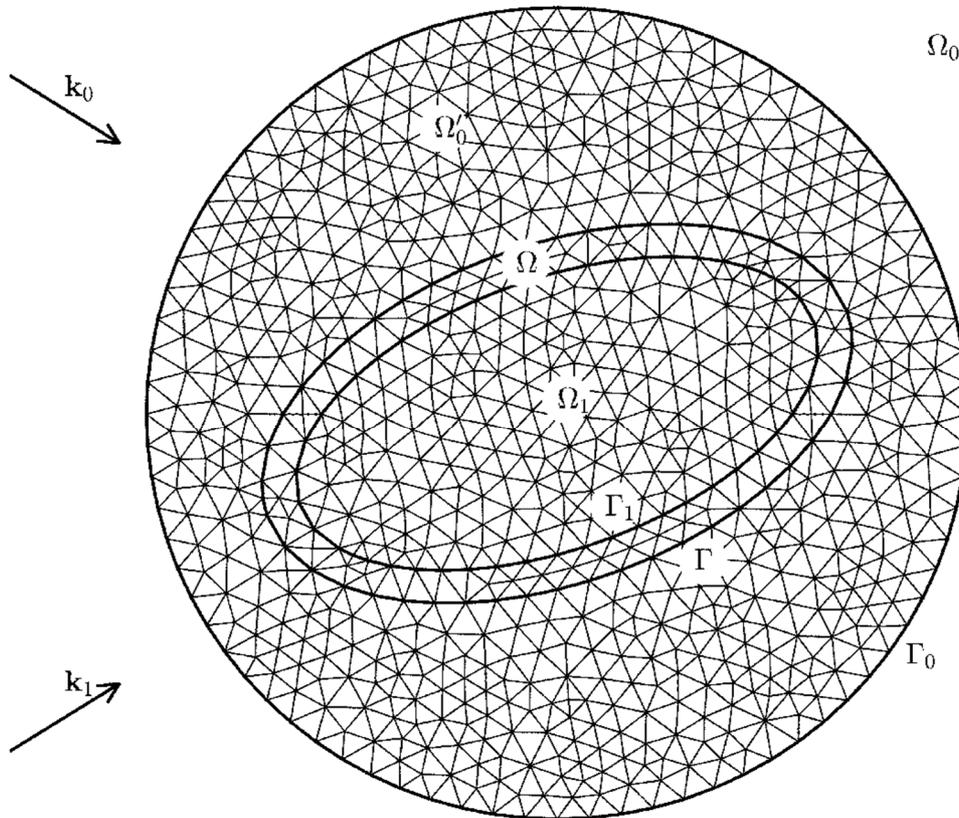


Рис. 5. Разбиение области Ω' конечными элементами

Таким образом, для рядов (19) получаем замкнутую краевую задачу в области Ω' , которая представлена уравнением Гельмгольца вида (7) для Ψ , уравнениями движения в форме (15) для \mathbf{u} и граничными условиями: (11), (12), второе условие (16).

Решая указанную задачу методом конечных элементов, получим узловые значения ψ_k , \mathbf{U}_k . Подставляя ψ_k в (20), находим коэффициенты в разложении рассеянного поля (17).

Полученное решение было использовано для проведения численных экспериментов для анализа нормированной форм-функции амплитуды потенциала скорости Ψ_s в рассеянной волне вдали от цилиндра

$$F(\varphi) = \frac{2}{\sqrt{\pi k_0 a'}} \left| \sum_{m=-\infty}^{\infty} (-i)^m A_m \exp(im\varphi) \right|, \quad (21)$$

где $a' = (a + b)/2 + h$; величина $k_0 a'$ – приведенный волновой размер сечения цилиндра – характеризует отношение среднего радиуса цилиндра и длины волны. Величина $F(\varphi)$ получена на основе асимптотического пове-

дения функции Ханкеля при больших значениях аргумента и пропорциональна амплитуде давления в дальней зоне рассеянного поля [27] в плоскости нормального сечения цилиндра (плоскости xOy).

При расчетах использовались следующие свойства идеальной жидкости в Ω_0 : $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c_0 = 1485 \text{ м/с}$. Упругая среда однородной части цилиндра и упругого полупространства Ω_0 задавалась свойствами: $\rho_2 = \rho_1 = 2700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_2 = \lambda_1 = 5.3 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $\mu_2 = \mu_1 = 2.6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. Базовые характеристики материала неоднородного слоя выбраны такими же, что и в однородной части цилиндра. Здесь представлены варианты неоднородности слоя, когда в нем меняется только плотность. Так что свойства среды в области Ω имеют вид: $\rho = f(q)\rho_1$, $\lambda = \lambda_1$, $\mu = \mu_1$, где q – параметр, введенный в соотношениях (6) и имеющий смысл расстояния до текущей точки неоднородного слоя цилиндра до поверхности его однородной части.

Рассматривались три варианта зависимости $f(q)$:

$$\text{а) } f_0(q) = 1; \quad \text{б) } f_1(q) = 1.5 - q/h; \quad \text{в) } f_2(q) = 0.5 + q/h. \quad (22)$$

Случай а) соответствует однородному материалу. В случае б) величина плотности линейно убывает от величины $1.5\rho_1$ на внутренней поверхности неоднородного слоя до значения $0.5\rho_1$ на внешней поверхности. Функция $f_2(q)$ задает вариант линейного возрастания плотности от $0.5\rho_1$ до $1.5\rho_1$.

Были использованы следующие параметры геометрии задачи: $b/a = 0.5$, $h/a = 0.2$, $d/a = 15$. Приведенный волновой размер сечения цилиндра был задан 7.5. В большей части представленных расчетов полагается, что $\alpha = 20^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ$, $\varphi_0 = -20^\circ$.

На рис. 6-11 представлены диаграммы зависимостей (21) ($\varphi \in [0, \pi]$) при некоторых сочетаниях параметров задачи. Штриховой линией на графиках показана зависимость $F(\varphi)$ для случая однородного цилиндра ($f(q) = f_0(q)$) с числовыми значениями параметров, указанными выше. Тонкой пунктирной линией вблизи начала координат изображено сечение цилиндра с внешним слоем. Оно иллюстрирует соотношение a , b , h и угол α .

На рис. 6 сплошной линией изображена диаграмма для $d = 30a$. Таким образом, увеличение расстояния цилиндра от упругого полупространства приводит к небольшому изменению коэффициента отражения (в сторону увеличения в освещенной области и – уменьшения в теневой).

Рис. 7 иллюстрирует влияние на рассеянное поле поворота цилиндра вокруг оси. Сплошной линией показана диаграмма для $\alpha = 25^\circ$. Увеличение α на 5° изменяет максимум в лепестках диаграммы направленности от 8% до 17%.

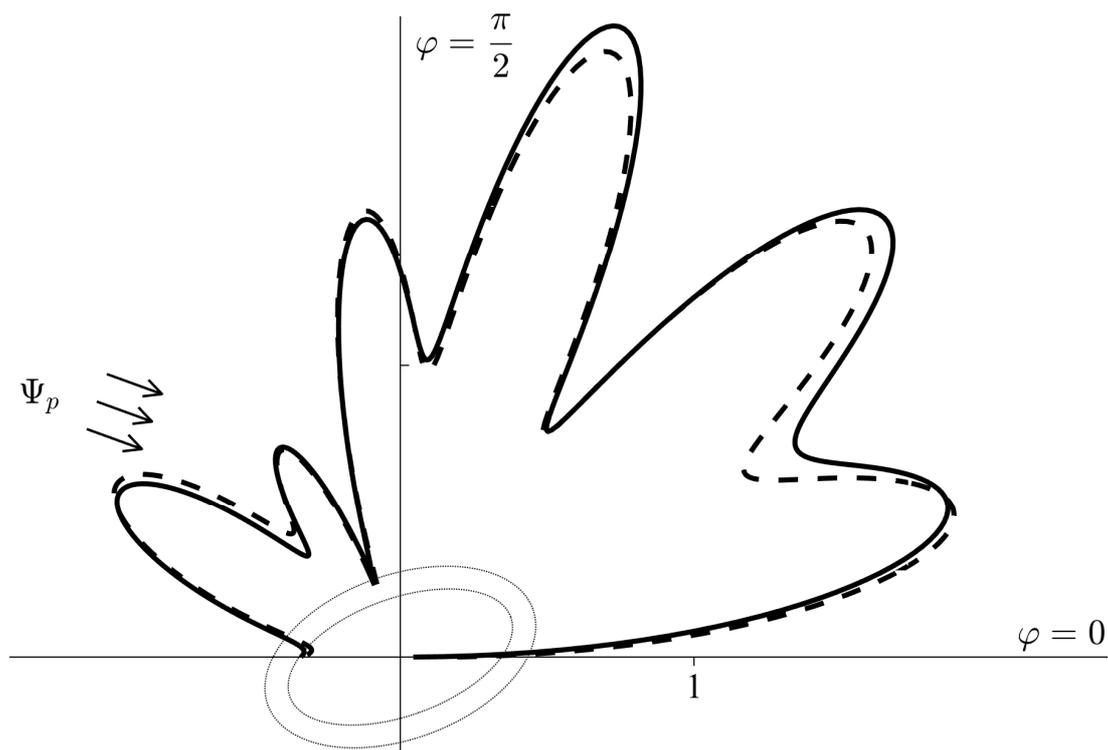


Рис. 6. Диаграмма $F(\varphi)$ при изменении d

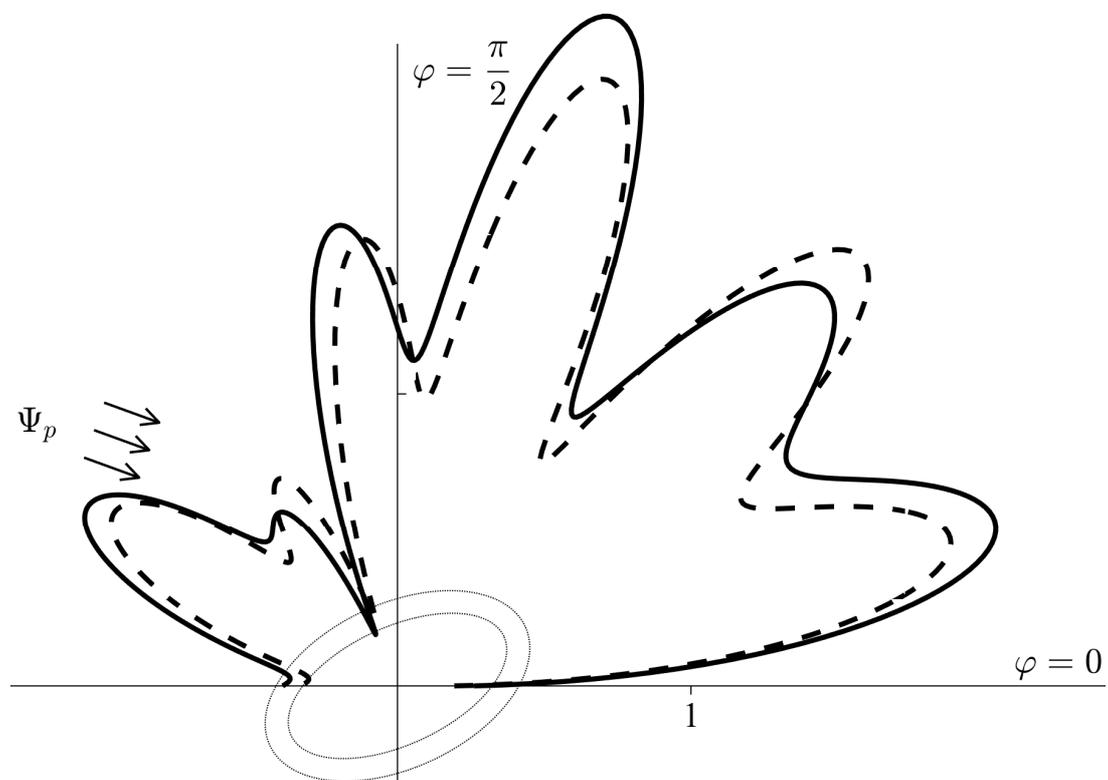


Рис. 7. Влияние угла поворота цилиндра α

Полученное решение предполагает в общем случае произвольную ориентацию волнового вектора падающей волны по отношению к оси цилиндра. В большей части представленных расчетов предполагается, что угол между ними прямой ($\theta_0 = 90^\circ$). А на рис. 8 показано изменение диаграммы направленности при $\theta_0 = 60^\circ$ (сплошная линия). Как видно изменение направления распространения волны приводит и к значительным изменениям и коэффициента отражения в максимумах лепестков диаграммы и их углового расположения. Кроме того наблюдается появление узкого лепестка при $\varphi = 0$.

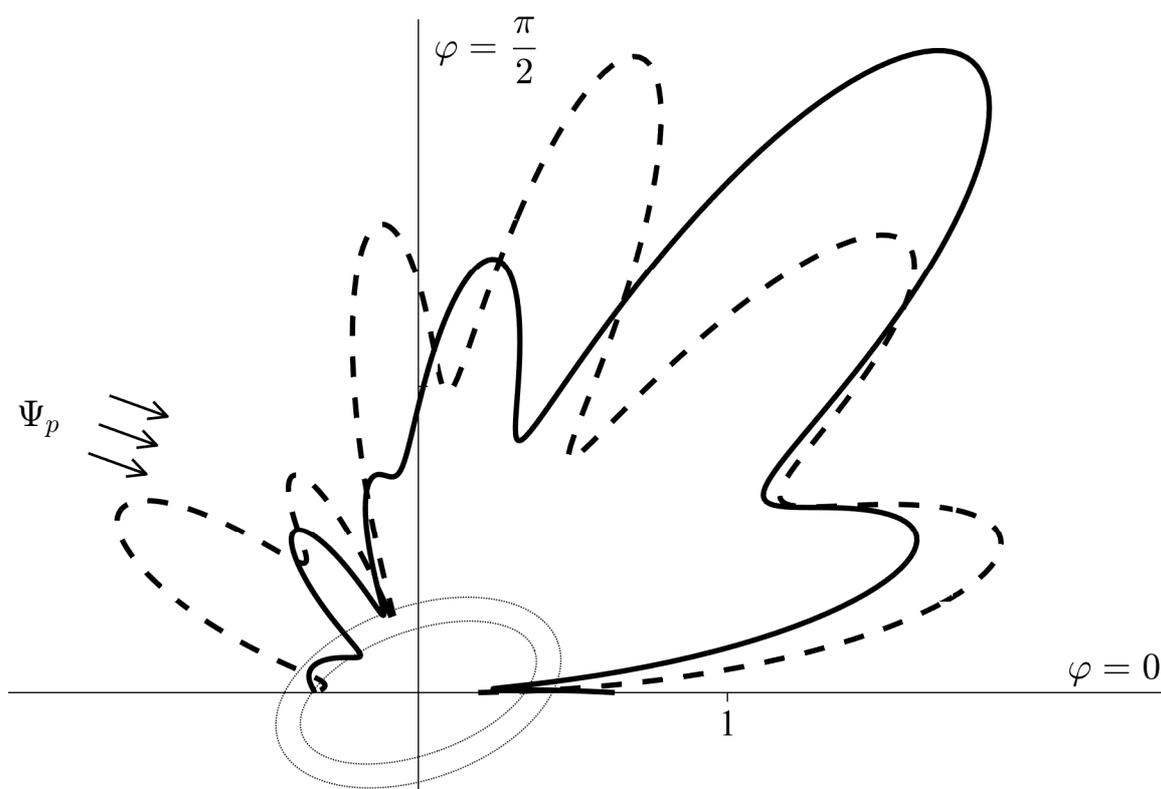


Рис. 8. Диаграмма $F(\varphi)$ при изменении θ_0

На рис. 9-10 показано влияние неоднородности внешнего слоя цилиндра. Сплошная линия на рис. 9 построена для случая, когда плотность покрытия изменяется по закону (22 б).

Эта неоднородность приводит к уменьшению коэффициента отражения в боковых лепестках диаграммы $F(\varphi)$ и увеличению в двух основных лепестках.

Рис. 10 показывает, что неоднородность вида $\rho = f_2(q)\rho_1$ уменьшает максимумы коэффициента отражения в крайних лепестках при $\varphi = 15^\circ$, 40° , 155° . При этом в трех центральных лепестках, примыкающих к $\varphi = 90^\circ$, коэффициент отражения увеличивается.

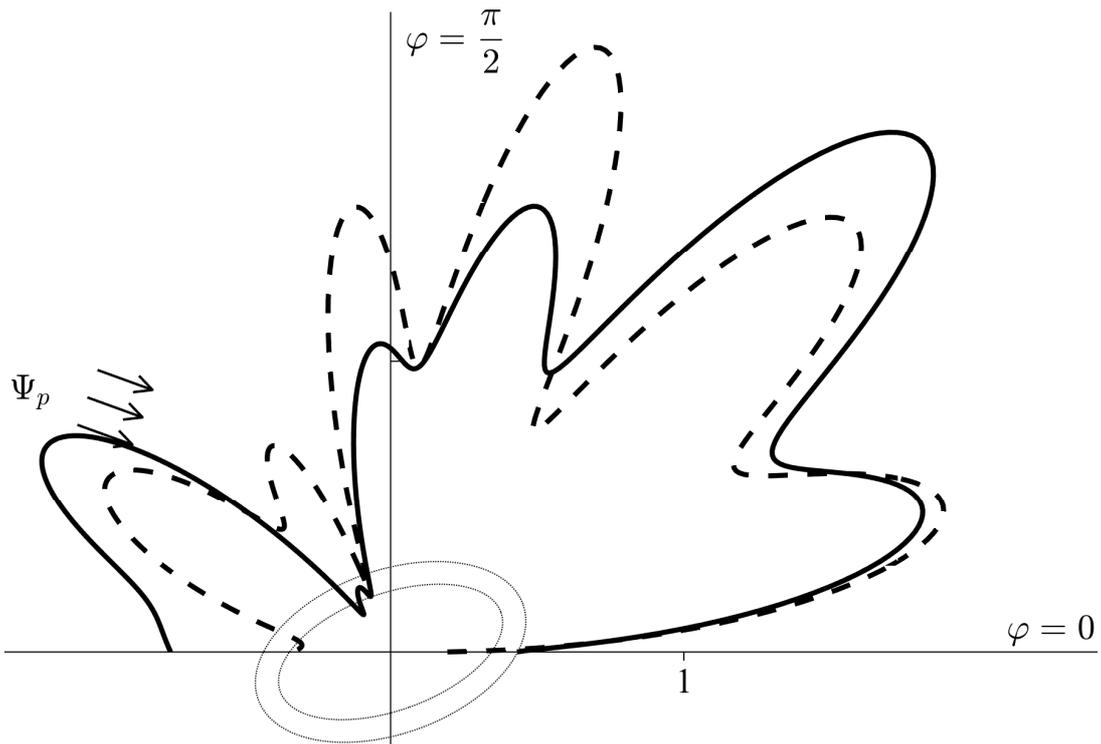


Рис. 9. Диаграмма $F(\varphi)$ при неоднородности покрытия вида (22 б)

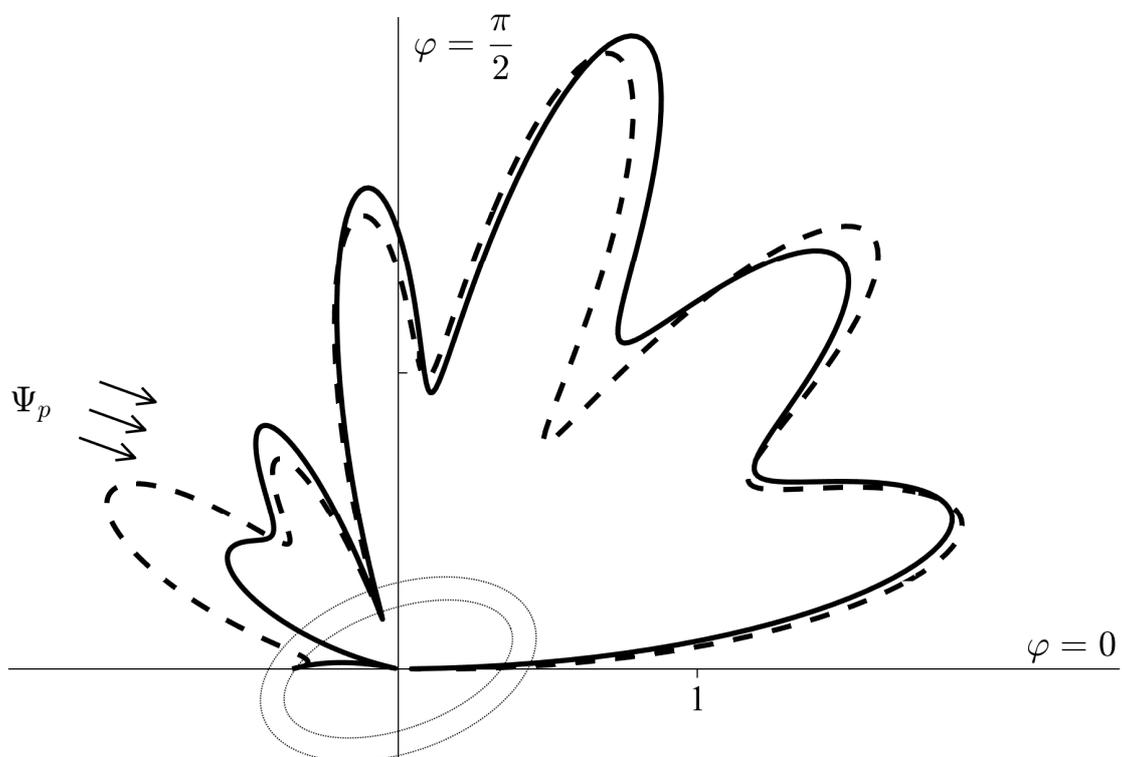


Рис. 10. Диаграмма $F(\varphi)$ при неоднородности покрытия вида (22 в)

Наконец, рис. 11 иллюстрирует изменение диаграммы направленности $F(\varphi)$ при использовании покрытия цилиндра из другого материала. Сплошная линия на нем показывает зависимость (21) для случая, когда ма-

териал внешнего слоя цилиндра является однородным со свойствами: $\rho = 8960 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 13.8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $\mu = 4.4 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. Приведенная диаграмма показывает, что выбором материала покрытия можно значительно изменить характеристики рассеяния звука цилиндром.

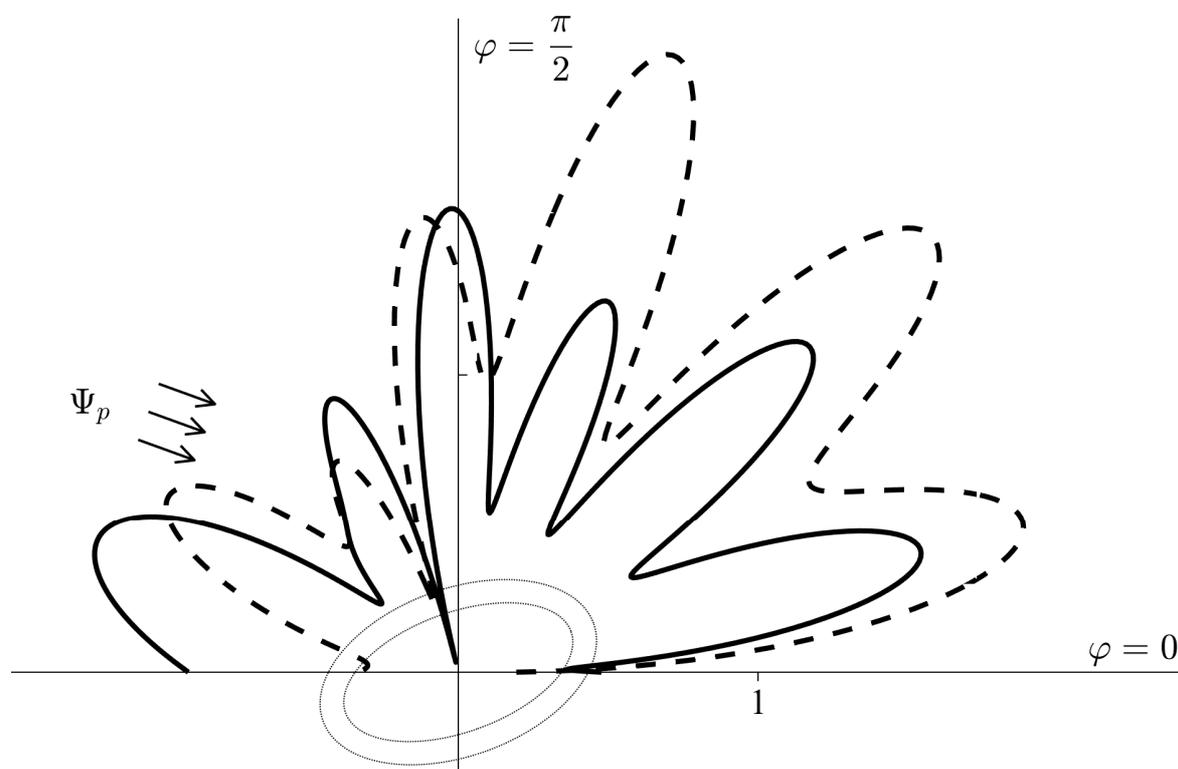


Рис. 11. Влияние изменения материала покрытия

Таким образом, представленные результаты показывают, что при $k_0 a' = 7.5$ на процесс рассеяния заметное влияние оказывают и геометрические параметры задачи и свойства материала внешнего слоя цилиндра. Это может быть использовано при идентификации параметров задачи по рассеянному звуковому полю.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 18-11-00199).

Список литературы

1. Barakat R. Diffraction of plane waves by an elliptic cylinder // J. Acoust. Soc. Am. 1963. V. 35. N. 12. P. 1990-1996.
2. Лейко А.Г., Омельченко А.В. Дифракция плоской звуковой волны на акустически жестких эллиптических цилиндрах // Акустический журнал. 1976. Т. 22. № 1. С. 171-173.
3. Lauchle G.C., Kim K. Acoustic Intensity Scattered from an Elliptic Cylinder // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 109. N. 5. P. 2342-2342.

4. Mitri F.G. Acoustic backscattering and radiation force on a rigid elliptical cylinder in plane progressive waves // *Ultrasonics*. 2015. V. 66. P. 27-33.
5. Андронов И.В. Дифракция на эллиптическом цилиндре с сильно вытянутым сечением // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60. № 3. С. 219-226.
6. Андебура В.А. Силецкий С.М. Рассеяние звука эллиптическим цилиндром со смешанными граничными условиями // *Акустический журнал*. 1973. Т. 19. № 6. С. 897-901.
7. Burke J.E. Low-frequency approximation for scattering by penetrable elliptic cylinders // *J. Acoust. Soc. Am.* 1964. V. 36. N. 11. P. 2059-2070.
8. Goel G.C. Jain D.L. Scattering of plane waves by a penetrable elliptic cylinder // *J. Acoust. Soc. Am.* 1981. V. 69. N. 2. P. 371-379.
9. Hong K., Kim K. Natural mode analysis of hollow and annular elliptical cylindrical cavities // *J. Sound and Vibration*. 1995. V. 183. N. 2. P. 327-351.
10. Hasheminejad S.M., Sanaei R. Acoustic Scattering by an Elliptic Cylindrical Absorber // *Acta Acustica united with Acustica*. 2007. V. 93. N. 5. P. 789-803.
11. Pillai T.A., Varadan V.V., Varadan V.K. Sound scattering by rigid and elastic infinite elliptical cylinders in water // *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 72. N. 4. P. 1032-1037.
12. Pereira A., Tadeu A., Antonio J. Influence of the cross section geometry of a cylindrical solid submerged in an acoustic medium on wave propagation // *Wave Motion*. 2002. V. 36. N. 1. P. 23-39.
13. Leon F., Chati F., Conoir J.-M. Modal theory applied to the acoustic scattering by elastic cylinders of arbitrary cross section // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 116. N. 2. P. 686-692.
14. Seyyed M.H., Sanaei R. Acoustic radiation force and torque on a solid elliptic cylinder // *J. Comp. Acoust.* 2007. V. 5. N. 3. P. 377-399.
15. Толоконников Л.А., Лобанов А.В. Дифракция плоской звуковой волны на неоднородном упругом эллиптическом цилиндре с полостью // *Известия ТулГУ. Естественные науки*. 2011. Вып. 3. С. 126-136.
16. Скобельцын С.А., Ларин Н.В. Дифракция звуковых волн на упругом цилиндре с неконцентрической эллиптической полостью // *Вестн. ТулГУ. Серия: Дифференциальные уравнения и прикладные задачи*. 2011. Вып. 1. С. 38-48.
17. Толоконников Л.А. О рассеянии плоской звуковой волны упругим эллиптическим цилиндром с несколькими полостями // *Известия ТулГУ. Естественные науки*. 2012. Вып. 2. С. 157-164.
18. Scharstein R.W. Davis A.M.J. Acoustic scattering by a rigid elliptic cylinder in a slightly viscous medium // *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 121. N. 6. P. 3300-3310.
19. Hasheminejad S.M., Sanaei R. Ultrasonic scattering by a fluid cylinder of elliptic cross section, including viscous effects // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. 2008. V. 55. N. 2. P. 391-404.

20. Simon M.M., Radlinski R.P. Elastic wave scattering from elliptical shells // J. Acoust. Soc. Am. 1982. V. 71. N. 2. P. 273-281.
21. Chinnery P.A., Humphrey P.A. Fluid column resonances of water-filled cylindrical shells of elliptical cross section // J. Acoust. Soc. Am. 1997. V. 103. N. 3. P. 1296-1305.
22. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
23. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
24. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
25. Королев А.Н., Скобельцын С.А. Метод конечных элементов в задаче о рассеянии плоской упругой волны неоднородным цилиндром // Известия ТулГУ Сер. Математика. Механика. Информатика. 2005. Т. 11. Вып. 5. С. 187-200.
26. Ihlenburg F. Finite element analysis of acoustic scattering. New York: Springer Publishing Comp. Inc., 2013. 226 p.
27. Скучик Е. Основы акустики. М.: Мир, 1976. Т. 2. 542 с.

Скобельцын Сергей Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, skbl@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пешков Никита Юрьевич, аспирант, инженер-программист, nikita.peshkoff@yandex.ru, Россия, Тула, Developer Express Inc.

*SCATTERING OF SOUND BY AN INHOMOGENEOUS ELASTIC
ELLIPTIC CYLINDER IN AN ACOUSTIC HALF-SPACE*

S.A. Skobel'tsyn, N.Y. Peshkov

A solution of the problem of diffraction of a plane sound wave on a inhomogeneous elastic elliptic cylinder is presented. The body is in an ideal fluid bounded by an elastic half-space. It is assumed that the media parameters of the outer layer depend on the distance from the surface of the homogeneous part of the cylinder. The solution is carried out under the assumption of a small effect of the reflection of sound from an elastic half-space. A numerical-analytical solution of the problem is obtained using the finite element method (FEM). The influence of the geometric parameters of the problem and the parameters of the cylinder inhomogeneity on the scattered sound in the far field is shown.

Key words: sound diffraction, harmonic plane wave, inhomogeneous elastic elliptical cylinder, elastic half-space, finite element method.

Skobel'tsyn Sergey Alekseevich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, skbl@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Peshkov Nikita Yurievich, postgraduate, software engineer, nikita.peshkoff@yandex.ru, Russia, Tula, Developer Express Inc.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ШЕВИНГОВАНИЯ-ПРИКАТЫВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

А.А. Маликов, А.В. Сидоркин

Рассмотрен ряд особенностей технологического обеспечения процесса комбинированной зубообработки при экспериментальных исследованиях. Выработаны рекомендации по разработке управляющей программы для станка с ЧПУ и оптимальной компоновке элементов технологической системы.

Ключевые слова: станок с ЧПУ, эксперимент, наладка, шевингование-прикатывание, технологическая система, оснастка.

Как уже отмечалось ранее, при решении задач, связанных с измерением температуры режущих зубьев инструмента в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес, вполне эффективным можно считать применение в качестве технологического оборудования – токарного станка с ЧПУ (модели 16К20Ф3), оснащенного многопозиционной револьверной головкой и обладающего, при этом, достаточной жесткостью [1 – 3]. Такое решение позволяет револьверной головке играть роль магазина-накопителя при обработке партии колес [4]. Последовательная обработка колес, осуществляемая в рамках замкнутого цикла по программе, позволяет добиться соблюдения заранее определенного жесткого временного регламента, что, в свою очередь, повышает точность и достоверность результатов измерений.

Процесс обработки цилиндрических зубчатых колес шевингованием-прикатыванием заключается в совместной обкатке инструмента и заготовки, находящихся в беззазорном зацеплении друг с другом [1, 2]. При этом инструментальная оправка с шевером-прикатником устанавливается в трехкулачковый самоцентрирующий клиновой патрон, оснащенный электромеханическим приводом зажима, а приспособление – державка, предназначенная для установки зубчатого колеса во время обработки, закрепляется в револьверной головке станка (рис.).

Нагрев режущих зубьев инструмента вызывает изменение (увеличение) сопротивления термометра ТЭП 018, подключенного к преобразователю «сопротивление-напряжение» [2]. При этом, передача электрического сигнала от чувствительного элемента термометра к преобразователю, осуществляется посредством установленных на корпусе оправки изолированных токосъемных колец на неподвижные токосъемники, размещенные, в свою очередь, на изолированных основаниях кронштейна, смонтированного на направляющей станка.

Хвостовик оправки зажимается в удлиненных кулачках патрона. Швер-прикатник устанавливается на гладкую цилиндрическую поверхность по посадке $H6/h6$. Инструмент прижимается к торцу оправки через кольцо и шайбу, фиксируется гайкой и контргайкой.

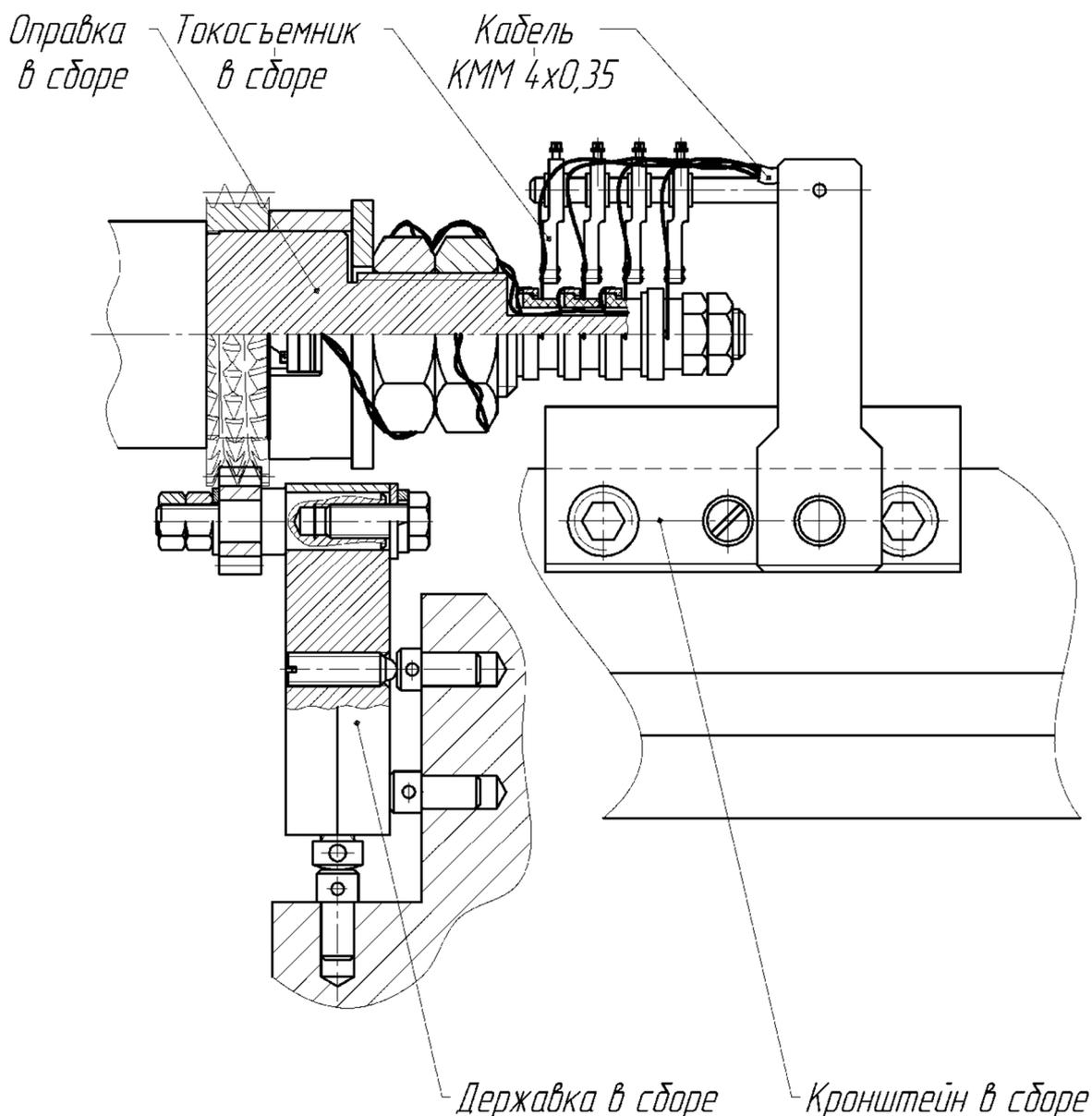


Рис. Эскиз позиции на обработку зубчатого колеса

Для реализации процесса в лабораторных условиях разработана специальная конструкция приспособления для установки зубчатых колес – державка [4], которая устанавливается в револьверную головку станка. При этом, ее базирование производится по плоскости основания корпуса (установочная база), задней грани корпуса и сферической головке винта, размещенного в корпусе поперечно (направляющая база), сферической головке винта, установленного продольно (опорная база). Эти два винта поз-

воляют регулировать вылет державки и компенсировать погрешности ее углового положения в установочной плоскости. Закрепление державки в корпусе револьверной головки производится при затягивании болта, взаимодействующего со скошенной шайбой. Последняя, в свою очередь, образует со скосом корпуса державки клиновую пару.

Обрабатываемое колесо устанавливается на палец по посадке $H7/h6$ и фиксируется на нем при помощи шайбы, гайки и контргайки. Последняя исключает возможность саморазвинчивания при реверсировании вращения пары инструмент-заготовка.

Вопросы разработки управляющей программы (УП) для осуществления процесса шевингования-прикатывания на токарном станке с ЧПУ были затронуты, в частности в работе [5].

В таблице приведен пример построения УП, обеспечивающей возможность оформления типовых циклов, задействованных в процессе, в качестве подпрограмм. При этом циклы осуществления рабочих и выхаживающих ходов в процессе шевингования-прикатывания разделены и представлены в виде отдельных подпрограмм.

Подпрограмма, задействованная для реализации рабочих ходов повторяется m раз – то количество, которое регламентировано для конкретного случая. Подпрограмма, реализующая циклы выхаживания обрабатывается два раза. Использование таких подпрограмм позволяет, в частности, компактизировать УП в целом, а также открывает возможность быстрого ее редактирования при необходимости обработки зубчатых колес различной конструкции.

Пример построения управляющей программы

Содержание кадра УП	Комментарий
1	2
O0001	Запуск программы «0001»
TN	Выбор N-ой позиции револьверной головки
G0 X100 Z200	Подвод револьверной головки к условной точке врезания на быстром ходу
G0 X80	Ввод заготовки в зацепление с инструментом в условной точке
M8	Включение СОЖ
O100	Запуск подпрограммы «100»
G0 C0 P X_1	Подвод инструмента в позиции шпинделя 0 градусов и врезание на величину на рабочего хода P X_1
G97 C α_1 S n_1 M3	Вращение шпинделя с частотой n_1 по часовой стрелке на угол $\alpha_1 = z_1 \cdot 360^\circ$, где z_1 – число зубьев обрабатываемой заготовки

Окончание таблицы

1	2
<i>M0</i>	Остановка шпинделя
<i>G97 Ca₁ sn₁ M4</i>	Вращение шпинделя против часовой стрелки
<i>M0</i>	Остановка шпинделя
<i>M99</i>	Конец подпрограммы
<i>M98 Pm O100</i>	Повторение подпрограммы «100» <i>m</i> раз.
<i>O101</i>	Запуск подпрограммы «101»
<i>G97 Ca₁ sn₁ M3</i>	Вращение шпинделя по часовой стрелке
<i>M0</i>	Остановка шпинделя
<i>G97 Ca₁ sn₁ M4</i>	Вращение шпинделя против часовой стрелки
<i>M0</i>	Остановка шпинделя
<i>M99</i>	Конец подпрограммы
<i>M98 P2 O101</i>	Повторение подпрограммы «101» 2 раза.
<i>M9</i>	Выключение СОЖ
<i>G28 U0 W0</i>	Отход инструмента к исходной точке <i>U0 W0</i>
<i>M30</i>	Конец программы

Таблица содержит необходимый набор комментариев, поясняющий механизм работы УП, поэтому в тексте настоящей статьи дополнительные пояснения не приводятся. Вместе с тем, следует отметить, что таблица содержит фрагмент УП, обеспечивающий возможность обработки одной заготовки, установленной в приспособлении, размещенном в соответствующей позиции револьверной головки станка.

Список литературы

1. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Некоторые особенности практической реализации процесса дискретной регистрации температуры вращающихся частей технологических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 2. С. 78-86.
2. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Особенности многоканального измерения и регистрации температуры в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 3. С. 149-156.
3. Сидоркин А.В. Технологическая оснастка для измерения температуры в зоне обработки цилиндрических колес шевингованием-прикатыванием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 8. С. 68-73.
4. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Разуваев М.Л., Смолянинов Н.С. Некоторые аспекты конструкторско-технологического обеспечения экспериментального исследования теплофизических параметров процесса ше-

вингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 4. С. 254-262.

5. Валиков Е.Н., Индан А.А., Попов А.Л. Экспериментальное исследование точности шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колёс на токарном станке с ЧПУ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 5. С. 11-17.

Маликов Андрей Андреевич, д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой, andrej-malikov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сидоркин Андрей Викторович, канд. техн. наук, доцент, alan-a@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

PECULIARITIES OF TECHNOLOGICAL PROVISION OF THE PROCESS OF SHAV-ROLLING CYLINDRICAL GEAR WHEELS IN LABORATORY CONDITIONS

A.A. Malikov, A.V. Sidorkin

A number of features of technological support of the combined toothworking process in experimental studies are considered. Recommendations have been worked out for the development of a control program for a CNC and the optimal arrangement of elements of the technological system.

Key words: CNC, experiment, adjustment, shav-rolling, technological system, rigging.

Malikov Andrey Andreevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, andrej-malikov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sidorkin Andrey Victrovich, candidate of technical science, docent, alan-a@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ ДИАПАЗОНОВ ДЛИНЫ ШАГА ЧЕТЫРЕХНОГО ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТА

С.И. Савин, Л.Ю. Ворочаева, А.В. Мальчиков

В работе решена задача определения допустимых диапазонов длины шага ногой четырехногого внутритрубного робота, движущегося в плоских трубах, для случая, когда одна пара ног взаимодействует со стенками внутренней поверхности трубы, а другая пара ног осуществляет шаг. Установлено влияние на значения диапазонов длины шага параметров самого робота, параметров, характеризующих расположение трубы в пространстве, а также параметров взаимодействия контактных элементов ног робота с поверхностью трубы.

Ключевые слова: внутритрубный шагающий робот, контактные точки, длина шага, диапазон допустимых значений.

Введение

Шагающие внутритрубные роботы могут перемещаться в плоских и пространственно-изогнутых трубопроводах, являющихся примером особенно сложной опорной поверхности, что было показано в [1-3]. Предложенные в этих работах методы генерации походки роботов основаны на использовании геометрического представления трубопровода, позволяющего проецировать его внутреннюю поверхность на так называемую карту высот, строить последовательности шагов на карте высот, а затем использовать обратное преобразование для получения последовательности шагов на внутренней поверхности трубы. Эти методы позволяют автоматизировать задачу поиска точек контакта с опорной поверхностью, сохраняя возможность управлять направлением и длиной шагов робота.

Задача выбора допустимых диапазонов длины шага внутритрубного робота в настоящее время еще не решена и остается актуальной. Сложность такой задачи заключается в том, что она является многокритериальной, т.е. зависит от большого числа параметров, обусловленных как конструкцией робота, в том числе его геометрией и кинематикой, генерируемой походкой, так и конфигурацией и расположением в пространстве трубопровода, кривизной его внутренней поверхности, а также от сочетания и комбинации значений этих параметров.

Помимо этого при определении допустимых диапазонов длины шага необходимо в каждый момент движения устройства решать задачу сохранения им статического равновесия. Под сохранением равновесия в данном случае понимается, что робот может осуществлять движение без незапланированной потери контакта с внутренней поверхностью трубопровода и без проскальзывания контактных элементов. Понятие «равновесие» здесь употребляется по аналогии с тем, как этот термин используется в робото-

технике шагающих машин, где незапланированное проскальзывание или потеря контакта с опорной поверхностью ассоциируются с потерей равновесия (или «вертикальной устойчивости») и падением [4-8].

Здесь рассмотрим задачу выбора допустимых диапазонов длины шага четырехногого робота для случая, когда контакт с противоположными стенками трубы осуществляется одной парой ног (передней или задней), а другая пара при этом совершает шаг.

Описание внутритрубного робота

В качестве расчетной схемы шагающего внутритрубного робота, перемещающегося внутри плоских труб, будем рассматривать показанную на рис. 1, а и являющуюся одной из наиболее распространенных. Положим, что исследуемый робот состоит из четырех ног $i=1-4$, каждая из которых образована двумя звеньями E_iD_i и D_iK_i , и корпуса 5, имеющего форму прямоугольника с центром масс в точке C . Каждое звено ноги будем считать стержнем с центром масс, совпадающим с центром симметрии. Все звенья робота соединены между собой активными вращательными шарнирами E_i и D_i . Ноги периодически контактируют с внутренней поверхностью трубы 6 при помощи контактных элементов K_i .

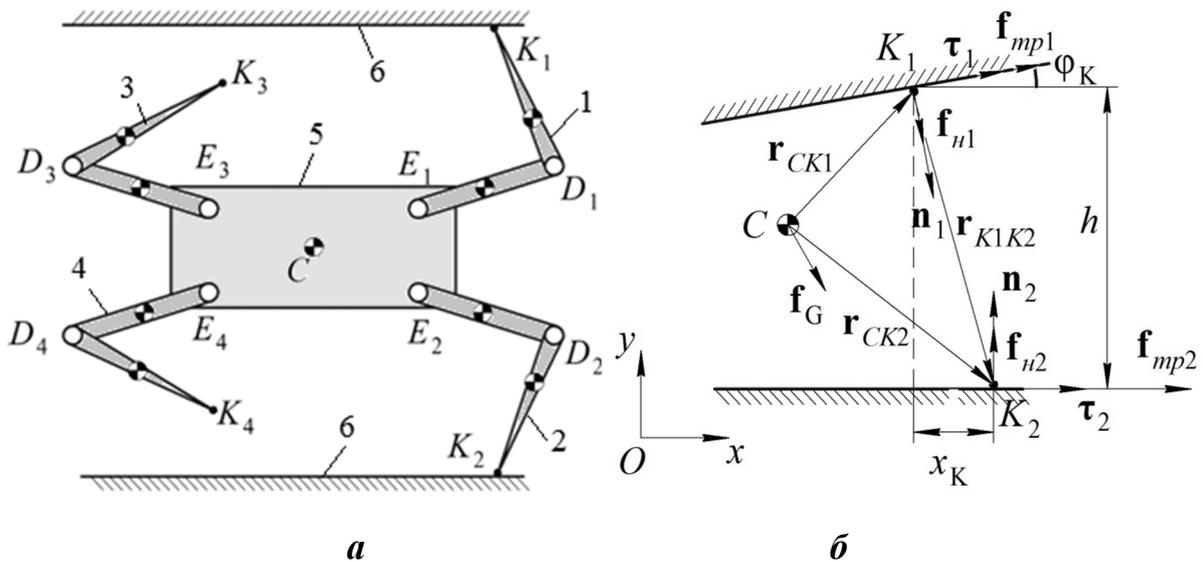


Рис. 1. Конструктивная и расчетная схемы: а – конструктивная схема внутритрубного робота: 1 - 4 – ноги; 5 – корпус; 6 – труба; б – Расчетная схема робота, контактирующего с внутренней поверхностью трубы в двух точках

В данной работе ограничимся рассмотрением таких походок робота, при которых одна пара ног (передняя или задняя) совершает шаг, а вторая пара ног при этом контактирует со стенками трубы, т.е. точки контакта принадлежат противоположным стенкам трубы.

Математическая модель движения робота

Перейдем к описанию математической модели движения робота, для этого рассмотрим расчетную схему, показанную на рис. 1, б. Данная схема представлена для случая, когда контакт со стенками 1 и 2 внутренней поверхности трубы осуществляется передней парой ног (в контактных точках K_1 и K_2), а задняя пара ног реализует шаг. Для упрощения восприятия схемы сам робот на ней не показан.

Для описания движения робота введена абсолютная система координат Oxy , расположенная таким образом, что одна из стенок трубы параллельна одной из ее осей. На рис. 1, б стенка трубы 2 параллельна оси Ox . Отметим, что данная система координат может быть произвольным образом ориентирована относительно гравитационного поля, направление которого показано вектором силы тяжести \mathbf{f}_G робота. В точках контакта ног робота со стенками трубы введены локальные системы координат таким образом, что \mathbf{n}_i и $\mathbf{\tau}_i$ представляют собой нормальный и тангенциальный векторы к опорной поверхности (стенке трубы) в точке контакта K_i . Будем рассматривать случай, когда стенки трубы не параллельны друг другу, тогда ее расширение определяется углом Φ_K , являющимся углом между векторами $\mathbf{\tau}_1$ и $\mathbf{\tau}_2$.

Относительное взаимное расположение точек контакта K_1 и K_2 задается параметрами x_K и h . Первый из них представляет собой расстояние, определяемое как длина проекции вектора $\mathbf{r}_{K_1K_2}$, проведенного между K_1 и K_2 , на вектор $\mathbf{\tau}_2$:

$$x_K = \mathbf{r}_{K_1K_2} \cdot \mathbf{\tau}_2.$$

А второй является локальным диаметром трубы и определяется как расстояние от точки K_1 до прямой с направляющим вектором $\mathbf{\tau}_2$.

Радиус-вектор центра масс робота можно записать следующим образом:

$$\mathbf{r}_C = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \end{bmatrix},$$

где x_C, y_C – координаты точки C в проекциях на оси Ox и Oy .

При определении допустимых диапазонов длины шага ноги робота важно знать не абсолютные координаты контактных точек, а их относительное положение. В связи с этим соответствующие радиус-векторы запишем в виде:

$$\mathbf{r}_{K_1} = \begin{bmatrix} x_K \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{r}_{K_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ h \end{bmatrix}.$$

Вектор \mathbf{f}_G можно представить следующим образом:

$$\mathbf{f}_G = \begin{bmatrix} f_{Gx} \\ f_{Gy} \end{bmatrix},$$

где f_{Gx}, f_{Gy} – проекции вектора силы тяжести на координатные оси.

Пусть контактное взаимодействие ног робота с внутренней поверхностью трубы описывается силами сухого трения Кулона \mathbf{f}_{mpi} с коэффициентами трения μ_i и записывается как

$$\mathbf{f}_{mp1} = x_1 \boldsymbol{\tau}_1, \mathbf{f}_{mp2} = x_2 \boldsymbol{\tau}_2,$$

где x_1, x_2 – скалярные параметры.

Также будем считать, что нормальные реакции \mathbf{f}_{ni} в точках K_1 и K_2 , описываемые формулами

$$\mathbf{f}_{n1} = y_1 \mathbf{n}_1, \mathbf{f}_{n2} = y_2 \mathbf{n}_2,$$

где y_1, y_2 – скалярные параметры, не могут превышать некоторого наибольшего значения N_{\max} . Тогда условия статического равновесия робота можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{f}_{mp1} + \mathbf{f}_{n1} + \mathbf{f}_{mp2} + \mathbf{f}_{n2} + \mathbf{f}_G = \mathbf{0}, \\ [\mathbf{r}_{CK1}]_{\times}(\mathbf{f}_{mp1} + \mathbf{f}_{n1}) + [\mathbf{r}_{CK2}]_{\times}(\mathbf{f}_{mp2} + \mathbf{f}_{n2}) = \mathbf{0}, \\ -\mu_i \mathbf{f}_{ni} < \mathbf{f}_{mpi} < \mu_i \mathbf{f}_{ni}, \quad i = 1, 2, \\ 0 < \|\mathbf{f}_{ni}\| < N_{\max}, \quad i = 1, 2, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{r}_{CKi} – вектор, проведенный от точки C к точке K_i ; $[\cdot]_{\times}$ – представление вектора в виде кососимметрической матрицы, такой что $[\mathbf{a}]_{\times} \mathbf{b} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$.

Для определения допустимых диапазонов длины шага ног робота необходимо установить, сохраняет ли робот в каждом заданном положении статическое равновесие, т.е. необходимо проверить справедливость условий (1).

Для этого сформулируем следующую задачу квадратичного программирования:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad x_1^2 + y_1^2 + x_2^2 + y_2^2 \\ & \text{subject to:} \\ & \begin{cases} x_1 \boldsymbol{\tau}_1 + y_1 \mathbf{n}_1 + x_2 \boldsymbol{\tau}_2 + y_2 \mathbf{n}_2 + \mathbf{f}_G = \mathbf{0}, \\ [\mathbf{r}_{CK1}]_{\times}(x_1 \boldsymbol{\tau}_1 + y_1 \mathbf{n}_1) + [\mathbf{r}_{CK2}]_{\times}(x_2 \boldsymbol{\tau}_2 + y_2 \mathbf{n}_2) = \mathbf{0}, \\ y_i \leq N_{\max}, \quad i = 1, 2, \\ -y_i \leq 0, \\ x_i - \mu_i y_i \leq 0, \\ -x_i - \mu_i y_i \leq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Если задача (2) имеет решение, то условия (1) могут быть выполнены. Для решения задачи (2) можно использовать численные методы, описанные, например, в [9-11].

Определение допустимых диапазонов длины шага робота

В качестве параметров, оказывающих влияние на диапазоны допустимых значений длины шага робота, будем рассматривать следующие: h – локальный диаметр трубы, μ – коэффициент сухого трения между контактным элементом ноги робота и поверхностью трубы, Φ_K – угол расширения трубы, N_{\max} – наибольшее значение нормальной реакции в точке контакта ноги робота с поверхностью трубы, f_{Gx} , f_{Gy} – проекции вектора силы тяжести робота на оси абсолютной системы координат, x_C , y_C – координаты центра масс робота. Следует отметить, что характер влияния каждого из рассмотренных параметров зависит от значения прочих.

Введем обозначение:

$$\mathbf{k} = [h \quad \Phi_K \quad f_{Gx} \quad f_{Gy} \quad x_C \quad y_C \quad \mu \quad N_{\max}] .$$

Также для диапазона допустимых значений x_K , заданного как $\forall x_K \in [x_{K \min} \quad x_{K \max}]$, введем обозначение

$$L_x = x_{K \max} - x_{K \min} ,$$

где L_x – длина диапазона.

Рассмотрим подход, позволяющий провести анализ чувствительности L_x по отношению к значению параметров \mathbf{k} . Для этого зафиксируем значение одного из компонентов вектора \mathbf{k} , например k_j . Оставшиеся 7 компонентов вектора будем принимать равными псевдослучайным числам, получаемым с использованием последовательности Соболя (также известной как ЛПт последовательность) [12]. При построении последовательностей учитываются диапазоны, характерные для каждого из компонентов вектора \mathbf{k} . Обозначим сконструированный таким образом вектор \mathbf{k} как \mathbf{k}_j^p , где p – номер элемента в последовательности Соболя.

Таким образом, можем задать последовательность чисел $p = \overline{1, m}$, где m – число элементов последовательности. Этой последовательности соответствует множество $P_j = \{\mathbf{k}_j^p : p \in \overline{1, m}\}$. Для каждого элемента данного множества \mathbf{k}_j^p можно вычислить соответствующее ему значение L_x , решая задачу (2) для различных величин x_K . Обозначим найденное таким образом значение L_x , соответствующее выбранному \mathbf{k}_j^p , как L_j^p . Тогда можем найти среднее для всех L_j^p , соответствующих множеству P_j :

$$L_j^{mean} = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m L_j^p.$$

При выборе достаточно большого значения m величина L_j^{mean} зависит только от значения k_j . Зависимость L_j^{mean} от k_j иллюстрирует чувствительность к данному параметру.

Продemonстрируем этот подход на примере параметра h . Остальные параметры изменялись в диапазонах $\varphi_K \in [-\pi/3 \ \pi/3]$, $f_{Gx} \in [-100 \ 100]$ Н, $f_{Gy} \in [-100 \ 0]$ Н, $x_C \in [-1 \ 1]$ м, $y_C \in [0 \ h]$, $\mu \in [0.1 \ 1]$ и $N_{max} \in [10^2 \ 10^3]$ Н. Для нахождения L_h^{mean} использовалось $m = 50$. Полученная зависимость показана на рис. 2, а.

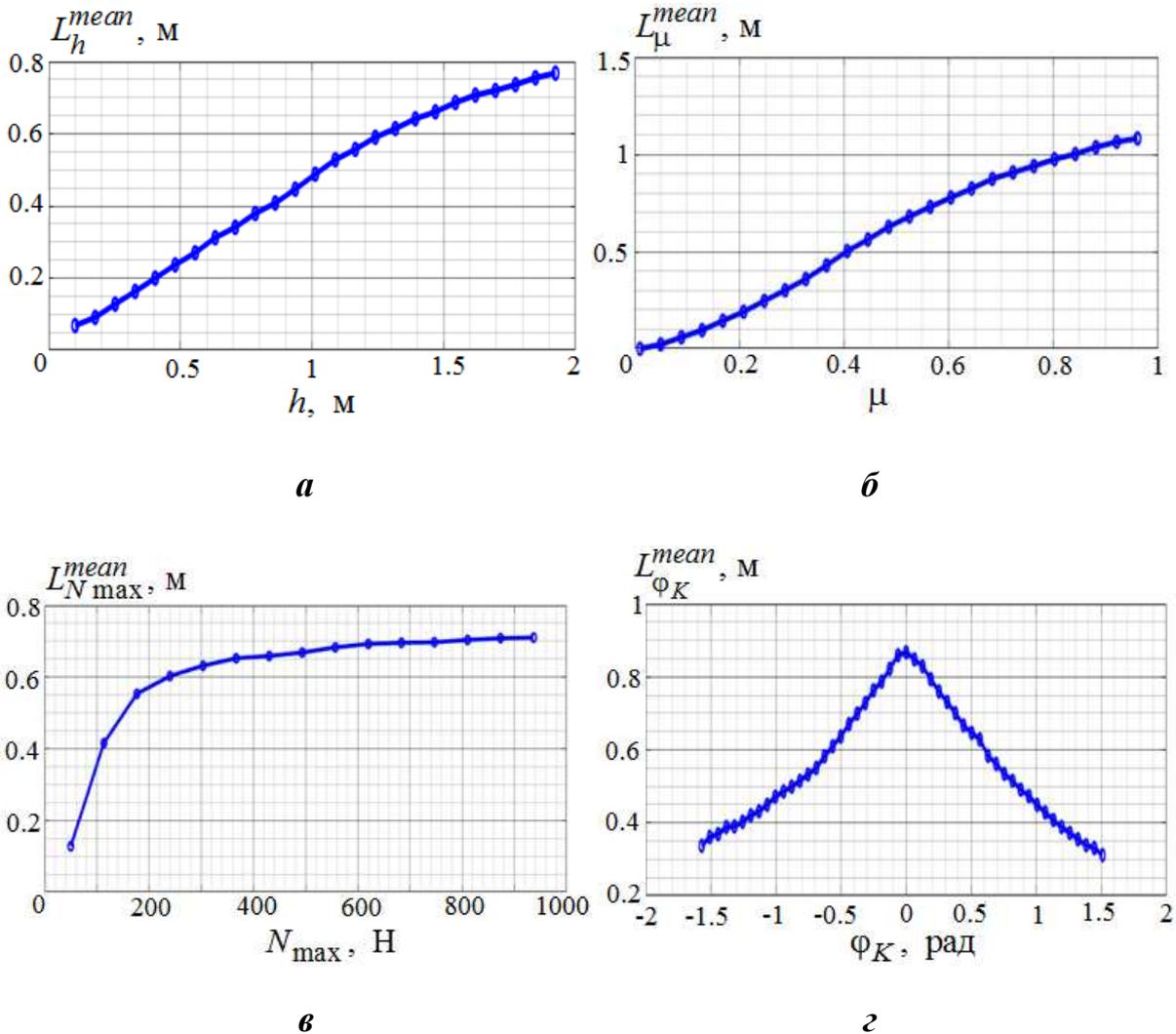


Рис. 2. Зависимости: а – $L_h^{mean}(h)$; б – $L_\mu^{mean}(\mu)$; в – $L_{N_{max}}^{mean}(N_{max})$;

г – $L_{\varphi_K}^{mean}(\varphi_K)$

Рис. 2, а демонстрирует, что имеет место близкая к линейной зависимость между параметром h и величиной диапазона допустимых значений x_K . Это означает, что в трубах большего диаметра робот сможет совершать большие шаги. Аналогичным образом построены остальные зависимости.

На рис. 2, б показана зависимость L_{μ}^{mean} от μ , параметр h в этом и всех последующих экспериментах изменялся в диапазоне $h \in [0.1 \ 2]$ м. Данная зависимость сходна с той, что была получена в предшествующем эксперименте, и также демонстрирует линейный характер. Можно сделать вывод, что увеличение коэффициента трения между внутренней поверхностью трубопровода и контактными элементами позволяет совершать шаги большей длины.

Показанная на рис. 2, в зависимость $L_{N_{max}}^{mean}$ от N_{max} в отличие от предыдущих экспериментов демонстрирует «насыщение». Величина $L_{N_{max}}^{mean}$ монотонно увеличивается с ростом N_{max} , но при $N_{max} > 300$ Н этот рост становится достаточно медленным. Данная зависимость может быть использована при выборе приводов при проектировании такого рода роботов. Заметим, что этот параметр не меняется на протяжении всего времени работы робота и заранее известен для конкретного экземпляра робота, что позволяет использовать его точное значение в алгоритмах выбора длины шага.

Представленная на рис. 2, г зависимость $L_{\phi_K}^{mean}$ от ϕ_K демонстрирует пик величины $L_{\phi_K}^{mean}$ для труб постоянного диаметра и значительное уменьшение этого значения для труб с меняющимся диаметром. Диапазон изменения $L_{\phi_K}^{mean}$ в данном случае существенный и составляет 0.6 м. Это означает, что при перемещении по участкам трубопровода, где диаметр трубы претерпевает изменения, следует уменьшать длину шага. Эта рекомендация может быть использована независимо от прочих результатов, представленных в этой работе.

На рис. 3 представлена серия результатов влияния проекций силы тяжести робота и расположения его центра масс на диапазоны длины шага. Зависимость $L_{x_C}^{mean}$ от x_C , показанная на рис. 3, а, имеет параболическую форму. Заметим, что длина шага увеличивается при удалении центра масс робота (увеличении x_C) в положительном или в отрицательном направлении. При этом изменения $L_{x_C}^{mean}$ находятся в диапазоне 0.15 м, что намного ниже изменений этого параметра, зафиксированных в предшествующих

экспериментах. Это указывает на то, что параметр x_C оказывает существенно меньшее влияние на величину диапазона допустимых значений x_K , чем N_{\max} , μ или h .

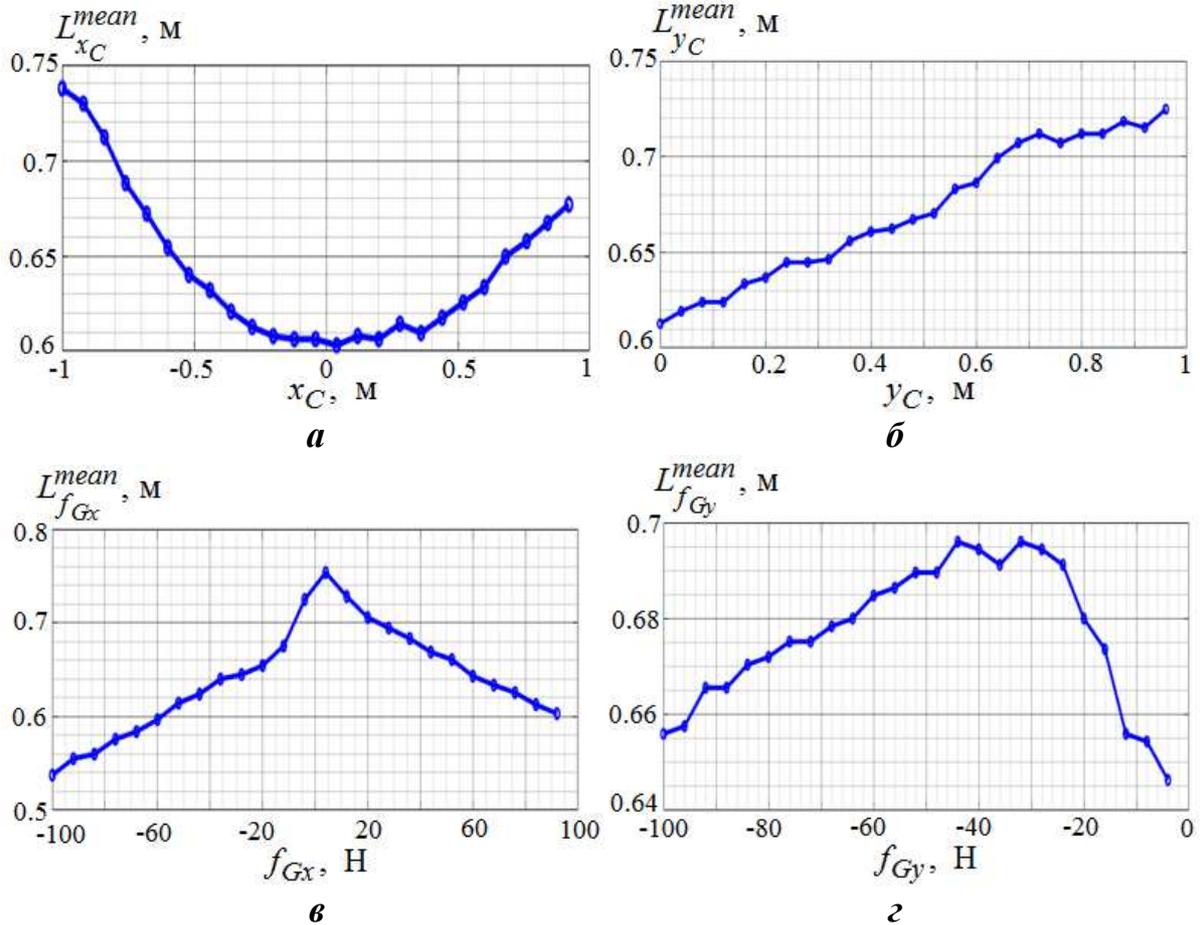


Рис. 3. Зависимости: а $-L_{x_C}^{mean}(x_C)$; б $-L_{y_C}^{mean}(y_C)$; в $-L_{f_{Gx}}^{mean}(f_{Gx})$; г $-L_{f_{Gy}}^{mean}(f_{Gy})$

В отличие от предшествующего эксперимента зависимость $L_{y_C}^{mean}$ от y_C (рис. 3, б) близка к линейной. Но так же, как и ранее, изменения $L_{y_C}^{mean}$ находятся в диапазоне 0.15 м. Это указывает на то, что и параметр y_C оказывает относительно небольшое влияние на размер диапазона допустимых значений x_K .

Рис. 3 в показывает, что наибольшая длина шага возможна в случае, когда робот движется в горизонтальных трубопроводах (т.е. при $f_{Gx} = 0$ Н). Изменения $L_{f_{Gx}}^{mean}$ находятся в диапазоне 0.2 м, что немного больше,

чем для зависимостей, связанных с параметрами x_C и u_C . Рис. 3, г иллюстрирует, что величина диапазона допустимых значений x_K слабо зависит от f_{Gy} – величина $L_{f_{Gy}}^{mean}$ изменяется в диапазоне 0.04 м.

Экспериментальные исследования

В этом разделе рассмотрим исследования, проведенные с использованием опытного образца шагающего внутритрубного робота (рис. 4). Целью эксперимента было установление диапазона допустимых значений x_K для робота в заданной конфигурации.

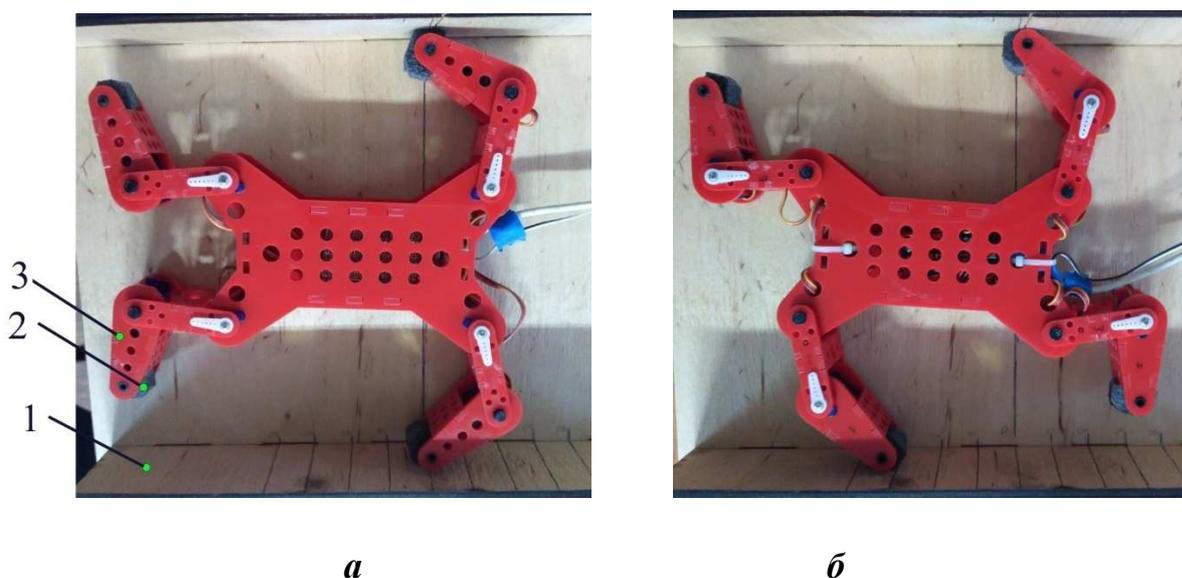


Рис. 4. Опытный образец робота: а – удерживающий равновесие, используя переднюю пару ног; б – удерживающий равновесие, используя переднюю нижнюю и заднюю верхнюю ноги; 1 – имитация стенки трубы; 2 – контактный элемент робота; 3 – звено робота

Экспериментальные исследования проводились в имитаторе трубопровода диаметром 214 мм, макет робота обладал массой 0.2 кг. Величина N_{max} для опытного образца оценивается как 4Н. В ходе эксперимента удалось установить, что диапазон допустимых значений x_K для опытного образца составил $[-0.062 \quad 0.064]$ м. На рис. 5 показано, как данный диапазон соотносится с результатами моделирования. Горизонтальными линиями показаны допустимые диапазоны x_K для заданного значения коэффициента трения (отложен по вертикали). Закрашенная область представляет собой диапазон x_K , найденный экспериментально.

Данные, представленные на рис. 5, указывают на то, что коэффициент трения между опорной поверхностью и роботом составлял 0.6.

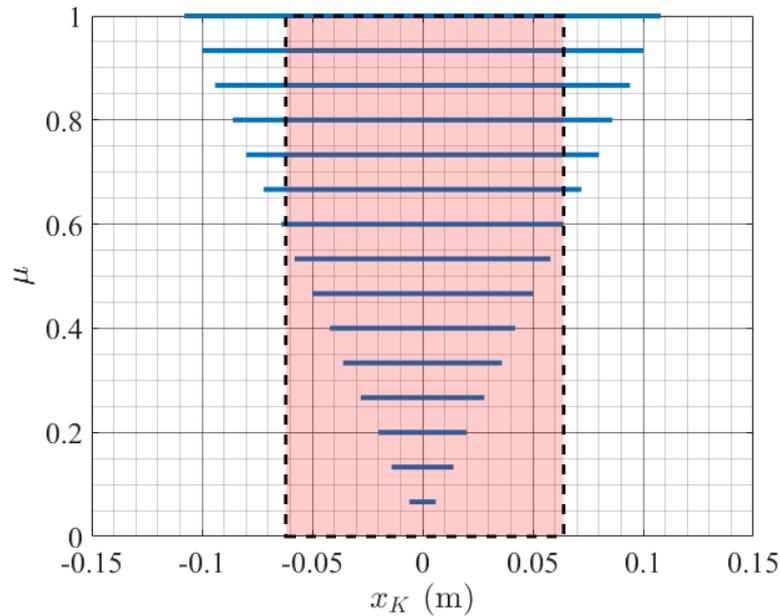


Рис. 5. Зависимость диапазонов допустимых значений x_K от коэффициента трения

Заключение

В статье представлены результаты исследования реализации такой походки четырехногого внутритрубного шагающего робота, при которой одна его пара ног (передняя или задняя) контактируют с внутренней поверхностью трубы, а другая пара ног совершает шаг, с точки зрения определения допустимых диапазонов длины шага. Разработана математическая модель движения устройства, записаны условия сохранения роботом статического равновесия в каждый момент перемещения, для проверки выполнения которых сформулирована задача квадратичного программирования.

Установлено влияние на значения диапазонов длины шага трех категорий параметров: 1) конструктивных и геометрических параметров робота (расположение его центра масс), 2) параметров, описывающих геометрию трубопровода и его расположение в пространстве (локальный диаметр трубы, угол расширения трубы, расположение трубы относительно гравитационного поля), 3) параметров, характеризующих контактное взаимодействие опорных элементов ног робота с внутренней поверхностью трубы (коэффициент трения, наибольшее значение нормальной реакции).

Представлены результаты экспериментальных исследований на опытном образце робота в имитаторе трубопровода, установлен диапазон допустимых значений длины шага робота в заданной конфигурации, проведено сравнение этих данных с теоретическими исследованиями.

Работа выполнена в рамках Гранта Президента Российской Федерации МК-2577.2017.8, договор №14.Z56.17.2577-МК.

Список литературы

1. Savin S., Vorochaeva L. Pace pattern generation for an pipeline robot // Proc. Intern. Conf. IEEE Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 16-19 May. 2017. St. Petersburg, Russia. P. 1-6.
2. Savin S., Vorochaeva, L. Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes // Proc. Intern. Siberian Conf. IEEE Control and Communications (SIBCON). 29-30 June. 2017. Astana, Kazakhstan. P. 1-6.
3. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva, L. 2017. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes // MATEC Web of Conf. 12th Intern. Scientific-Technical Conf. on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2017. 18-22 April. 2017. St. Petersburg, Russia. Vol. 113. P. 1-5.
4. Яцун С.Ф., Савин С.И., Яцун А.С., Турлапов Р.Н. Адаптивная система управления экзоскелета, осуществляющего вертикализацию человека // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. 2015. №. 3. С. 30.
5. Vukobratović M., Borovac B. Zero-moment point—thirty five years of its life // Intern. J. of humanoid robotics. 2004. Vol. 1. № 1. P. 157-173.
6. Ott C., Roa M.A., Hirzinger G. Posture and balance control for biped robots based on contact force optimization // Proc. IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots (Humanoids). 26-28 Oct. 2011. Bled, Slovenia. P. 26-33.
7. Яцун С.Ф., Савин С.И., Емельянова О.В., Яцун А.С., Турлапов Р.Н. Экзоскелеты: анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования. Курск: Университетская книга, 2015. 179 с.
8. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Postolnyi A. Control system parameter optimization for lower limb exoskeleton with integrated elastic elements // I Proc. 19th Intern. Conf. CLAWAR 2016. 12–14 September. 2016. London, UK. P. 797-805.
9. Boyd S., Vandenberghe L., Convex optimization. Vandenberghe: Cambridge university press, 2004. 730 p.
10. Grant M., Boyd S., Ye Y. CVX: Matlab software for disciplined convex programming. 2008. [Электронный ресурс] URL: <http://stanford.edu/~boyd/cvx>. (дата обращения: 10.06.2018).
11. Mattingley J., Boyd S. CVXGEN: A code generator for embedded convex optimization // Optimization and Engineering. 2012. Vol. 13. № 1. P. 1–27.
12. Соболев И. М. Равномерно распределенные последовательности с дополнительным свойством равномерности // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1976. Т. 16. №. 5. С. 1332-1337.

Савин Сергей Игоревич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, savinswsu@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Ворочаева Людмила Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, mila180888@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Мальчиков Андрей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, zveroknnp@gmail.com, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет

ON DETERMINING THE ALLOWED STEP LENGTHS RANGE FOR A FOUR-LEGGED IN-PIPE ROBOT

S.I. Savin, L.Yu. Vorochaeva, A.V. Malchikov

In the paper, the problem of determining the allowed range of step lengths for a four-legged in-pipe robot was considered. The case when the robot remain in contact with the inner surface of the pipe using only two of its legs is studied. The influence of structural parameters of the robot as well as the parameters of the pipe on the allowed step length ranges was studied. These parameters include the geometry of the pipe, friction, orientation of the pipe, the capabilities of the robot's motors.

Key words: in-pipe walking robot, contact elements, step length, range of step lengths.

Savin Sergey Igorevich, candidate of technical sciences, senior researcher, savinswsu@mail.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Vorochaeva Lyudmila Yurievna, candidate of technical sciences, docent, mila180888@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Malchikov Andrey Vasilievich, candidate of technical sciences, docent, zveroknnp@gmail.com, Russia, Kursk, South-West State University

УДК 62-23

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСА ДВУХСТУПЕНЧАТОГО
ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА**

Д.А. Насонов, М.Ю. Леонтьев, В.А. Раевский, А.Е. Смоловик

Рассматривается построение параметрической модели корпуса редуктора. Отмечаются некоторые нюансы моделирования, позволяющие впоследствии корректировать модель, уточняя ее характеристики по результатам экспериментальных исследований. Приводятся результаты построения амплитудно-частотных характеристик тестовой модели.

Ключевые слова: планетарный редуктор, корпус редуктора, конечно-элементная модель, динамические характеристики, амплитудно-частотная характеристика.

При построении конечноэлементных моделей машин и их узлов, в том числе и двухступенчатого планетарного редуктора, особое внимание уделяется моделированию их корпусных деталей, поскольку от динамических характеристик корпуса в значительной степени зависят вибрационные и шумовые характеристики всего изделия [1, 2]. В рамках рассматриваемой работы все построения выполнялись в среде «ANSYS MECHANICAL».

После построения тестовых фрагментов модели корпуса двухступенчатого планетарного редуктора на базе различных конечных элементов и оценки ресурсоемкости с учетом точности моделирования динамических характеристик [3] был сделан выбор в пользу оболочечных элементов первого порядка.

Для оперативного перестроения модели при поиске оптимальных параметров геометрии некоторых корпусных элементов на языке APDL (Ansys Parametric Design Language) была разработана программа для построения параметрической модели редуктора в сборе и, в частности, его корпуса.

Так как разрабатываемая модель корпуса должна войти в состав модели редуктора в сборе, который, в свою очередь, является компонентом моделируемого турбозубчатого агрегата, вопрос экономии вычислитель-

ных ресурсов стоял очень остро. По этой причине проведено большое количество численных исследований, направленных на поиск оптимального способа моделирования отдельных компонентов модели.

В результате найденных компромиссных решений была построена максимально упрощенная модель, адекватно, по мнению авторов, отражающая основные динамические характеристики объекта. Так, большинство узлов редуктора (оси, валы, муфты, шестерни и др.) строились по технологии «снизу-вверх», т. е. минуя этап построения геометрического моделирования и разбиения 3-D модели на конечные элементы. Практически это непосредственное построение конечноэлементной сетки с возможностью полного контроля ее качества. При этом был принят ряд допущений, упрощающих моделирование. Например, мелкие детали, небольшие отверстия, проточки, фаски не моделировались.

Исключением стал сам корпус. Сложность его геометрии не позволила в полной мере использовать возможности указанной технологии моделирования. На рис. 1 показана модель корпуса редуктора в разрезе, построенная с помощью набора поверхностей, которые впоследствии разбивались на оболочечные конечные элементы в автоматическом режиме.

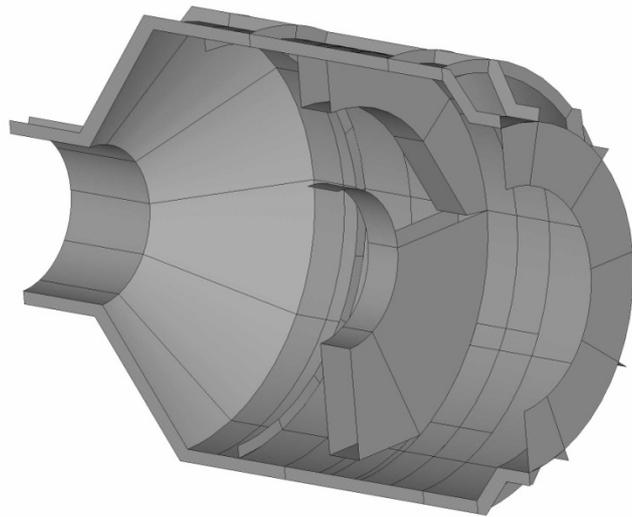


Рис. 1. Модель корпуса редуктора с элементами внутренних переборок и оребрения

Внутреннего алгоритма контроля качества полученной конечноэлементной сетки, встроенного в программный комплекс, оказалось достаточно для построения корректной, хотя и с избыточным в некоторых местах количеством конечных элементов, сетки.

Изменяющаяся толщина корпуса на некоторых участках усреднялась и считалась постоянной; следует отметить, что корректность последнего допущения пришлось оценивать при анализе форм собственных колебаний корпуса.

Введение в модель соответствующих параметров позволило корректировать толщину оболочек, соответствующих отдельным наборам поверхностей, а также расположение ребер жесткости, обеспечивая возможность последующей корректировки динамических характеристик изделия при его доводке.

В связи с наличием экспериментальных данных, в число которых входят амплитудно- фазо- частотные характеристики (АФЧХ) корпуса редуктора, полученные методом ударного возбуждения [4], целесообразно сравнить эти характеристики с расчетными, полученными с помощью построенной модели.

Поскольку экспериментальным исследованиям был подвергнут корпус в сборе с деталями и узлами, не имеющими подвижности относительно корпуса при работе редуктора, возникла необходимость добавить к модели корпуса водило первой ступени в сборе с осями сателлитов, вкладышами подшипников солнечной шестерни и элементами его крепления к корпусу, а также вкладыши подшипников водила и эпицикл второй ступени с его подвеской.

На рис. 2 схематично показана ось сателлита 3 в посадочных отверстиях щек водила первой ступени редуктора 1. Зазор показан утрированно большим в виде фиктивного элемента (компонента) 2, обеспечивающего упруго-демпферную связь между осью и щеками водила (типовой подход, используемый в программном комплексе ANSYS, для моделирования подобных узлов). На оси указаны две контрольные точки, расположение и нумерация которых соответствует схеме установки датчиков виброускорения при проведении экспериментального исследования [4].

Аналогичным образом в модели выполнены вкладыши подшипников солнечной шестерни первой ступени и водила второй ступени, установленные в посадочные отверстия с зазором, пусть минимальным, но создающим условия возникновения нестационарных пятен контакта. Данный эффект в качестве допущения в расчетной модели не учитывался.

При тестировании модели для вертикального гармонического возбуждения в контрольной точке «5» (F_5) был определен отклик в контрольной точке «6» в горизонтальном направлении и построены АФЧХ (H_{6-5}). В силу свойства взаимности перемещений для линейных систем характеристики H_{6-5} и H_{5-6} должны быть идентичны, что соответствует результатам тестовых расчетов.

Одна из полученных в ходе тестовых расчетов частотных характеристик приведена на рис. 3. Характеристики H_{i-j} представляют собой комплексную функцию от действительного аргумента и отображены в виде двух графиков – модуля и аргумента (амплитуды и фазы соответственно).

Приведенные характеристики получены при традиционном методе моделирования соединения ось – водило, как подшипника скольжения, что позволяет задавать стационарные значения жесткости и демпфирования в двух взаимно перпендикулярных направлениях в плоскости, перпендикулярной оси подшипника.

Однако при сравнении полученных графиков с результатами экспериментальных исследований были выявлены некоторые отличия. Это заставляет задуматься об их причинах и провести дополнительные исследования с использованием иной технологии, позволяющей учесть нестационарность пятна контакта.

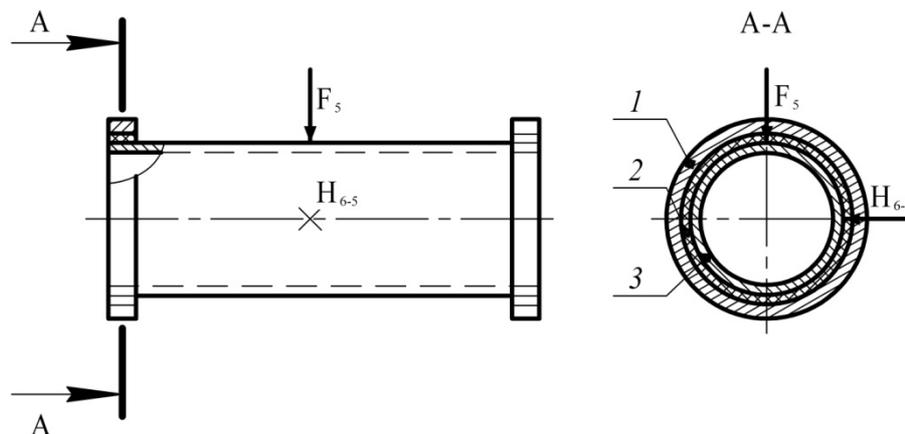


Рис. 2. *Направление приложения силы и регистрации отклика в контрольных точках на оси сателлита:
1 – щека водила; 2 – фиктивный элемент; 3 – ось сателлита*

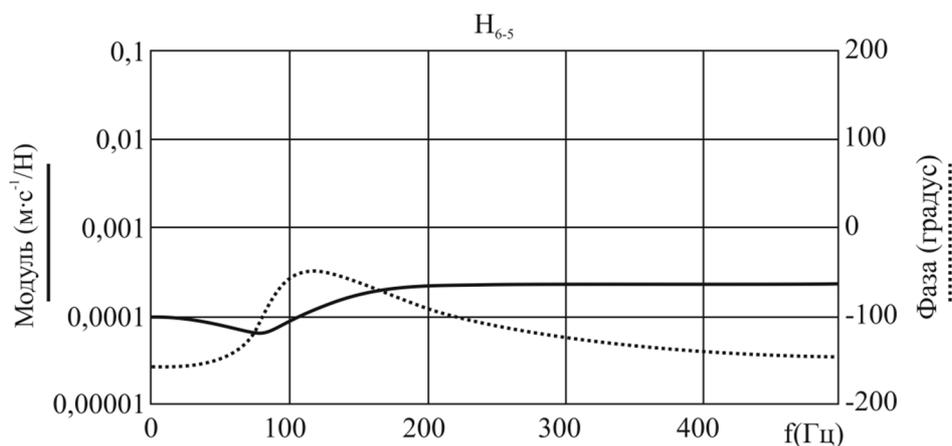


Рис. 3. *АФЧХ отклика в точке «6» при гармоническом возбуждении в точке «5»*

Еще одна АФЧХ – H_{20-2} , для контрольных точек на вкладыше входного вала (2) и вкладыше выходного вала (20) показана на рис. 4. Она тоже отличается от экспериментальных характеристик и все выше сказанное можно в полной мере отнести к данной характеристике.

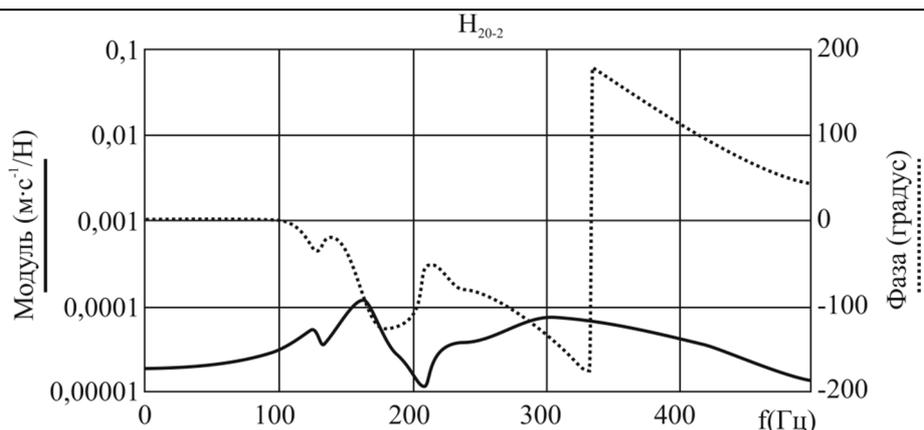


Рис.4. АФЧХ отклика в точке «20» при гармоническом возбуждении в точке «2»

Таким образом, тестовое моделирование и расчет АФЧХ корпуса в сборе с деталями и узлами, не имеющими подвижности относительно самого корпуса, выявил отличия в характеристиках, полученных экспериментальным и численным методом.

Предлагается провести дополнительные исследования с применением нового алгоритма моделирования контактирующих поверхностей, позволяющего корректировать жесткостные характеристики узлов с высшими кинематическими парами.

Впервые этот алгоритм был апробирован и дал положительный результат при моделировании соединения ось-сателлит [5, 6]. По мнению авторов, это является одной из наиболее вероятных причин расхождения результатов расчета и эксперимента.

Кроме того, такой подход позволит уточнить модель, а также адаптировать ее к реальным условиям эксплуатации по результатам экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Насонов Д.А., Леонтьев М.Ю., Бедный И.А. О конечноэлементном расчете динамических характеристик корпусных конструкций // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе. Всероссийская научно-техническая конференция. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. Т.2. С. 114-115.
2. Обыденков В.А., Анцев В.Ю., Сорокин П.А., Мишин А.В. Исследование устойчивости мобильных грузоподъемных машин методом конечных элементов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 3. С. 30-36.
3. Насонов Д.А. Методология расчета и динамический анализ турбозубчатых агрегатов главного привода судовых гребных винтов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2016. 278 с.

4. Пайчадзе Б.Б., Леонтьев М.Ю., Кирюхин А.В. и др. Опыт определения динамических характеристик судового редуктора // Научно-техническая библиотека АО Концерн «Моринформсистема-АГАТ», АО «Акустический институт академика Н.Н. Андреева» [Электронный ресурс] URL: <http://library.akin.ru/Rao/sess27/Пайчадзе.pdf>. (дата обращения: 10.06.2018).

5. Насонов Д.А., Леонтьев М.Ю. Альтернативное решение контактной задачи при моделировании напряженно-деформированного состояния сателлитного узла планетарного редуктора // Научные технологии. 2007. №4. Т.8. С.17-21.

6. Насонов Д.А. Исследование деформаций сателлитного узла планетарного редуктора с учетом контактного взаимодействия // Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе. Всероссийская научно-техническая конференция. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. Т.3. С. 72-73.

Насонов Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, nasonovda@yandex.ru, Россия, Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии Наук,

Леонтьев Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, newell-kaluga@mail.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Раевский Владимир Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, var-77@mail.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Смоловик Андрей Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, smolovik.andrey@sogaz.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

MODELING AND CALCULATION OF THE FREQUENCY RESPONSE CHARACTERISTICS OF THE HOUSING TWO-STAGE PLANETARY GEARBOX

D.A. Nasonov, M.Y. Leont'ev, V.A. Raevskiy, A.E. Smolovik

The construction of a parametric model of the gearbox housing is considered. Some nuances of modeling are noted, which allow to correct the model later, specifying its characteristics according to the results of experimental studies. The results of the frequency response of the test building model.

Key words: planetary gearbox, gearbox housing, finite element model, dynamic characteristics, response characteristic.

Nasonov Dmitriy Alexandrovich, doctor of technical sciences, senior staff scientist, nasonovda@yandex.ru, Russia, Moscow, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering,

Leont'ev Mikhail Yur'evich, candidate of technical sciences, docent, newell-kaluga@mail.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch,

Raevskiy Vladimir Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, var-77@mail.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch,

Smolovik Andrey Evgenievich, candidate of technical sciences, head of department, smolovik.andrey@sogaz.ru, Russia, Kaluga, Moscow state Technical University named after N. E. Bauman, Kaluga Branch

УДК 621.833.1

ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНФАЗНОГО ДВИЖЕНИЯ В ДВУХПОТОЧНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧЕ

В.А. Крюков, Л.В. Савельева

Рассмотрены режимы пересопряжения зубьев в двухпоточной прямозубой цилиндрической зубчатой передаче. Определены области существования различных режимов и возможности формирования необходимых режимов в асинфазных передачах.

Ключевые слова: зубчатые передачи, динамика, моделирование, передачи многопоточные, передачи двухпоточные, передачи асинфазные.

Постоянное увеличение мощности и протяженности современных машин различного отраслевого назначения приводит к значительному росту динамических нагрузок. Одновременное резкое повышение требований к точности работы машин, их надежности и долговечности, снижению уровня вибраций и шума, габаритно-массовым характеристикам требует точной оценки величины этих нагрузок и разработки методов их снижения. Известно, что точная оценка динамических процессов в машине возможна только при системном подходе и одновременном рассмотрении механических процессов, происходящих в передаточных механизмах и рабочих машинах, и электромагнитных процессов, протекающих в приводных электродвигателях [1-3]. Однако на первом этапе исследования для выявления качественных характеристик динамических процессов часто ограничиваются рассмотрением только механической части системы [4-16]. Составленная на этом этапе математическая модель используется затем в качестве составной части математической модели всей электромеханической системы [17].

Одним из наиболее перспективных конструкторских методов улучшения качества работы машин является использования многопоточных передаточных механизмов [18]. Причем, как известно, многопоточность может обеспечиваться как за счет использования нескольких параллельных кинематических цепей [19, 20], так и за счет выбора формы элементов кинематических пар.

Формирование нескольких параллельных кинематических цепей наиболее эффективно реализуется в планетарных передачах, число параллельных кинематических цепей в которых может достигать 12...24 [21, 22]. Тем не менее, многопоточность может быть реализована и на основе рядных зубчатых механизмов. На рис. 1 приведены типовые структурные схемы двухпоточных цилиндрических редукторов, в течение ряда лет серийно выпускаемых нашей промышленностью. Обычно одна или обе ступени редуктора выполняются с косозубыми зубчатыми колесами. Но возможен и вариант с прямозубыми зубчатыми колесами [23]. Наличие нескольких параллельных кинематических цепей будем называть кинематической многопоточностью и характеризовать коэффициентом кинематической многопоточности k_K . Соответствующую передачу будем называть k_K -поточной. Для приведенных схем этот коэффициент соответственно равен: рис. 1, а - первая ступень $k_K = 2$, вторая ступень $k_K = 1$; рис. 1, б - первая ступень $k_K = 1$, вторая ступень $k_K = 2$; рис. 1, в - первая и вторая ступени $k_K = 2$.

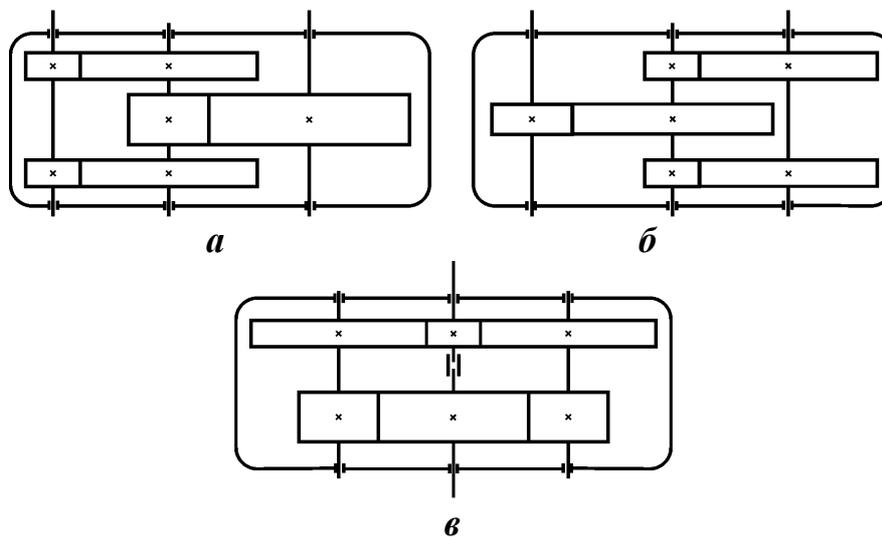


Рис. 1. Структурные схемы двухпоточных цилиндрических редукторов

Многопоточность в высшей кинематической паре зубчатой передачи реализуется за счет формы элементов пары, т.е. использования многопарного зацепления. Причем многопарное зацепление может быть реализовано как при стандартном, так и нестандартном исходных контурах [24-26]. Наличие нескольких элементов пары, одновременно передающих силы, будем называть силовой многопоточностью и характеризовать коэффициентом силовой многопоточности k_C . Для одной пары зубчатых колес он равен числу пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении этой пары. Для многопоточной передачи – числу пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении для всех параллельных зубчатых пар.

Как известно многопоточность в зубчатом зацеплении определяется коэффициентом перекрытия ε_γ , равным отношению угла перекрытия зубчатого колеса передачи к его угловому шагу [27]. В подавляющем боль-

шинстве случаев значение коэффициента перекрытия выражается дробным числом, а это значит, что число пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении, не будет постоянно и, следовательно, коэффициент силовой многопоточности будет являться некоторой функцией $k_c = k_c(\varphi)$ угла поворота зубчатого колеса φ . Изменение числа пар зубьев, находящихся в зацеплении в многопарных зацеплениях, приводит к изменению числа потоков энергии и её перераспределению по потокам, изменению сил, действующих на зубья передачи, изменению упругих характеристик в зацеплениях, возникновению параметрических колебаний, может вызвать параметрический резонанс [28].

Это приводит к необходимости решения двух задач:

- определение вида функции $k_c(\varphi)$. Знание этой функции необходимо для расчета максимальных сил, действующих на зубья передачи, и их обоснованного расчета на прочность и жесткость. Кроме того, зная эту функцию, можно определить закон изменения жесткости зацепления, что необходимо для исследования динамических процессов в передаче;

- исследование параметрических колебаний и условий возникновения параметрического резонанса в передаче.

Целью статьи является решение первой задачи – исследование вида функции $k_c = k_c(\varphi)$ в двухпоточной прямозубой цилиндрической зубчатой передаче и возможности влияния на вид этой функции.

Объект исследования. В качестве объекта исследования выберем двухпоточную передачу, состоящую из четырех прямозубых цилиндрических зубчатых колес, образующих две параллельные идентичные зубчатые пары внешнего зацепления 11-21, 12-22 с числами зубьев $z_{11} = z_{12} = z_1$ и $z_{21} = z_{22} = z_2$ соответственно (рис. 2, а). Деформации звеньев на этом этапе исследования не учитываем.

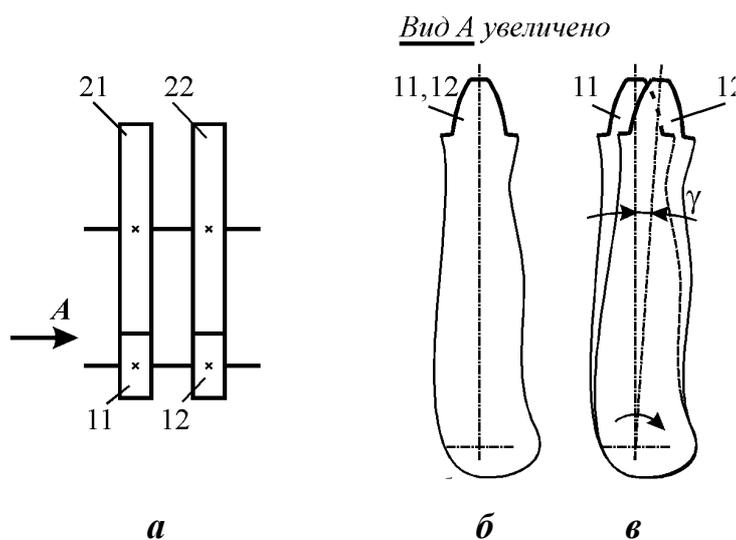


Рис. 2. Синфазная и асинфазная передачи:
а – структурная схема двухпоточной передачи;
б – синфазная передача; в – асинфазная передача

Зубчатые колеса соответствуют исходному контуру по ГОСТ 13755-81 с параметрами:

- угол главного профиля $\alpha = 20^\circ$;
- коэффициент высоты головки зуба $h_a^* = 1$;
- коэффициент высоты ножки зуба $h_f^* = 1,25$;
- коэффициент граничной высоты $h_l^* = 2$;
- коэффициент радиуса кривизны переходной кривой $\rho_f^* = 0,38$;
- коэффициент глубины захода зубьев в паре исходных контуров $h_w^* = 2$;
- коэффициент радиального зазора в паре исходных контуров $c^* = 0,25$.

Модификация профиля исходного контура отсутствует.

Основным параметром, влияющим на вид функции k_c , является коэффициент перекрытия ε_γ . Для рассматриваемой передачи он совпадает с коэффициентом торцового перекрытия ε_α . Для повышения нагрузочной способности зубчатых передач в современных машинах применяют нестандартные передачи с многопарным зацеплением при $\varepsilon_\alpha > 2$ и даже при $\varepsilon_\alpha > 3$ [24].

В стандартных цилиндрических зубчатых передачах при принятых значениях параметров исходного производящего контура коэффициент перекрытия вычисляется по известной формуле [29]

$$\varepsilon_\alpha = \frac{z_1 \operatorname{tg} \alpha_{a1} + z_2 \operatorname{tg} \alpha_{a2} - (z_1 + z_2) \operatorname{tg} \alpha_w}{2\pi}, \quad (1)$$

где α_{a1}, α_{a2} – углы профиля зубьев в точке на окружности вершин, $\cos \alpha_{a1} = \frac{d_{b1}}{d_{a1}}$, $\cos \alpha_{a2} = \frac{d_{b2}}{d_{a2}}$; $d_{b1} = d_1 \cos \alpha$, $d_{b2} = d_2 \cos \alpha$ – диаметры основных окружностей; $d_1 = mz_1$, $d_2 = mz_2$ – диаметры делительных окружностей; m – модуль зубчатых колес; $d_{a1} = d_1 + 2(h_a^* + x_1 - \Delta y)m$, $d_{a2} = d_2 + 2(h_a^* + x_2 - \Delta y)m$ – диаметры окружностей вершин; x_1, x_2 – коэффициенты смещения; $\Delta y = x_\Sigma - y$ – коэффициент уравнительного смещения; $x_\Sigma = x_1 + x_2$ – коэффициент суммы смещений; $y = \frac{a_w - a}{m}$ – коэффициент воспринимаемого смещения; $a = (z_1 + z_2)m$

– делительное межосевое расстояние; $a_w = \frac{(z_1 + z_2)m}{2} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w}$ – межосевое

расстояние; α_w – угол зацепления, $\operatorname{inv} \alpha_w = \frac{2x_\Sigma \operatorname{tg} \alpha}{z_1 + z_2} + \operatorname{inv} \alpha$.

Как видно из приведенных формул коэффициент перекрытия зависит от чисел зубьев и коэффициентов смещения. Модуль m не влияет на значение коэффициента перекрытия. Выбор чисел зубьев и коэффициентов смещения регламентируется возможностями зубообрабатывающего оборудования и осуществляется при синтезе зубчатой передаче по известным методикам [29, 30]. Для целей данного исследования достаточно знать границы изменения указанных параметров. Примем: $17 \leq z_1 \leq 50$, $17 \leq z_2 \leq 500$ – для некорректированной зубчатой передачи; $12 \leq z_1 \leq 50$, $12 \leq z_2 \leq 500$; $-1 \leq x_1 \leq 1$, $-1 \leq x_2 \leq 1$ – для корректированной передачи [30-33]. Кроме того, учитывая симметрию приведенных формул относительно z_1 , z_2 , введем дополнительное ограничение на значения чисел зубьев $z_1 \leq z_2$.

Выполненный анализ функции $\epsilon_\alpha(z_1, z_2, x_1, x_2)$ показал, что:

- значение коэффициента перекрытия монотонно увеличивается при увеличении чисел зубьев зубчатых колес;
- положительное смещение приводит к уменьшению коэффициента перекрытия, а отрицательное – к увеличению.

Экстремальные значения коэффициента перекрытия были определены численным методом в системе *Mathcad* на основе стандартных функций *Minimize* и *Maximize*. Для некорректированных зубчатых колес в принятом диапазоне изменения чисел зубьев коэффициент перекрытия находится в пределах от 1,515 ($z_1 = 17$, $z_2 = 17$) до 1,853 ($z_1 = 50$, $z_2 = 500$). Для корректированных зубчатых колес в принятом диапазоне изменения чисел зубьев и коэффициентов смещения коэффициент перекрытия находится в пределах от 0,832 ($z_1 = 12$, $z_2 = 12$, $x_1 = 1$, $x_2 = 1$) до 2,725 ($z_1 = 49$, $z_2 = 49$, $x_1 = -1$, $x_2 = -1$).

В соответствии с этими результатами принимаем границы изменения коэффициента перекрытия: для некорректированных зубчатых передач $1,515 \leq \epsilon_\alpha \leq 1,853$; для корректированных передач $-1 \leq \epsilon_\alpha \leq 2$. При $\epsilon_\alpha < 1$ передача неработоспособна.

Исследование функции $k_c(\varphi)$. В обычном двухпоточном цилиндрическом редукторе колеса параллельных зубчатых пар ориентированы одинаково (см. рис. 2, б). Если не учитывать деформации звеньев, то углы поворота соответствующих колес будут совпадать: $\varphi_{11} = \varphi_{12} = \varphi_1$; $\varphi_{21} = \varphi_{22} = \varphi_2$, а число параллельных потоков энергии будет определяться периодической функцией

$$k_c(\varphi) = k_{c1}(\varphi_{11}) + k_{c2}(\varphi_{12}) \quad (2)$$

с периодом $\tau_1 = \frac{2\pi}{z_1}$, равным угловому шагу шестерен 11 и 12. В формуле

(2) число пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении в первой и второй передаче соответственно, будет равно:

$$k_{c1}(\varphi_{11}) = k_{c2}(\varphi_{12}) = \begin{cases} 2 & \text{при } 0 \leq \varphi_1 < \tau_1(\varepsilon_\alpha - 1); \\ 1 & \text{при } \tau_1(\varepsilon_\alpha - 1) < \varphi_1 < \tau_1. \end{cases}$$

Или

$$k_c(\varphi_1) = \begin{cases} 4 & \text{при } 0 \leq \varphi_1 < \tau_1(\varepsilon_\alpha - 1); \\ 2 & \text{при } \tau_1(\varepsilon_\alpha - 1) < \varphi_1 < \tau_1. \end{cases}$$

Функции $k_c(\varphi_1)$, $k_{c1}(\varphi_{11})$, $k_{c2}(\varphi_{12})$ записаны для одного периода. Графическая иллюстрация закона изменения коэффициента силовой многопоточности для одного периода приведена на рис. 3.

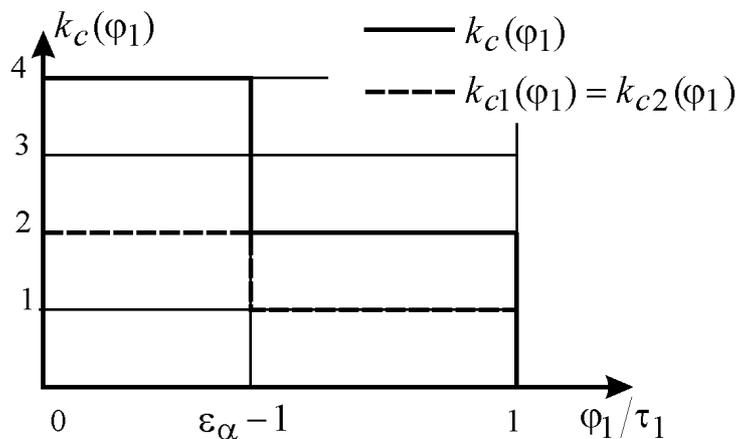


Рис. 3. Коэффициент силовой многопоточности синфазной передачи

Характер изменения функций $k_c(\varphi_1)$, $k_{c1}(\varphi_{11})$, $k_{c2}(\varphi_{12})$ аналогичен, а динамические процессы в одно- и двухпоточной передачах будут описываться одинаковыми, хорошо известными математическими моделями [28, 34]. По аналогии с терминами, введенными в [35] для передач, состоящих из трех последовательно соединенных зубчатых колес, такие передачи назовем синфазными.

Изменение вида функции $k_c(\varphi_1)$ может быть обеспечено за счет начального поворота шестерни 12 одной зубчатой пары относительно шестерни 11 на угол γ (см. рис. 2, в). Зубчатое колесо 22 относительно колеса 21 надо будет повернуть на угол γ/i_{12} , где i_{12} – передаточное отношение зубчатой пары. Такую передачу будем называть асинфазной, а угол γ – углом фазового сдвига, коэффициент $k_\gamma = \tau_1/\gamma$ – коэффициентом фазового сдвига. Очевидно, что $0 \leq \gamma < \tau_1$, $0 \leq k_\gamma < 1$. Передачи при $k_\gamma = 0$ и $k_\gamma = 1$ тождественны и являются синфазными передачами.

Функция $k_{c2}(\varphi_1)$ в этом случае будет сдвинута на угол γ по отношению к функции $k_{c1}(\varphi_1)$, $k_{c2}(\varphi_1) = k_{c1}(\varphi_1 + \gamma)$. Вид функции $k_{c2}(\varphi_1)$ при этом будет зависеть от соотношения между k_γ и ε_α :

– если $k_\gamma + \varepsilon_\alpha \leq 2$, то

$$k_{c2}(\varphi_1) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq \varphi_1/\tau_1 < k_\gamma; \\ 2 & \text{при } k_\gamma \leq \varphi_1/\tau_1 < k_\gamma + \varepsilon_\alpha - 1; \\ 1 & \text{при } k_\gamma + \varepsilon_\alpha - 1 \leq \varphi_1/\tau_1 < 1; \end{cases} \quad (3)$$

– если $k_\gamma + \varepsilon_\alpha > 2$, то

$$k_{c2}(\varphi_1) = \begin{cases} 2 & \text{при } 0 \leq \varphi_1/\tau_1 < \varepsilon_\alpha + k_\gamma - 2; \\ 1 & \text{при } \varepsilon_\alpha + k_\gamma - 2 \leq \varphi_1/\tau_1 < k_\gamma; \\ 2 & \text{при } k_\gamma \leq \varphi_1/\tau_1 < 1. \end{cases} \quad (4)$$

Графическая иллюстрация данных зависимостей приведена на рис. 4.

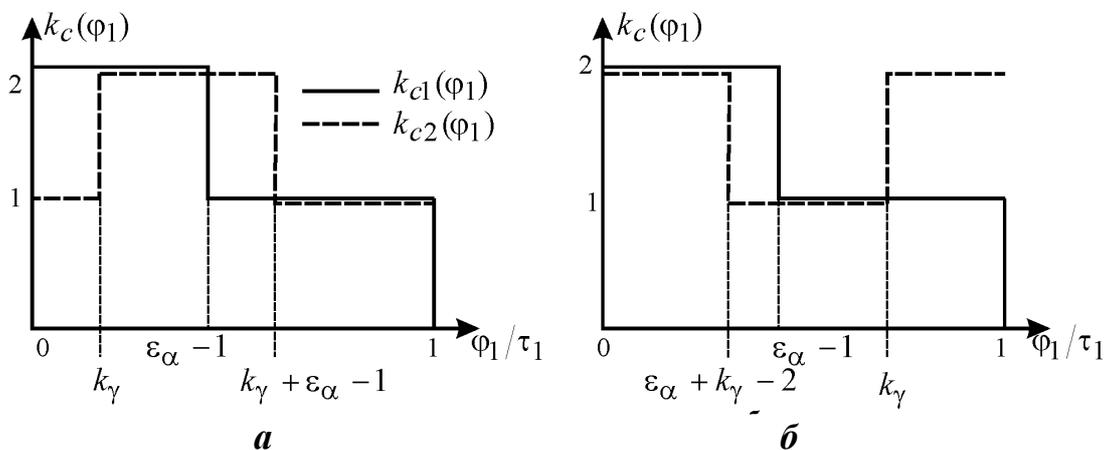


Рис. 4. Коэффициенты силовой многопоточности зубчатых пар в асинфазной передаче:

а – $k_\gamma + \varepsilon_\alpha \leq 2$; **б** – $k_\gamma + \varepsilon_\alpha > 2$

Вид суммарной функции $k_c(\varphi_1)$ и её значения также будут определяться соотношениями между параметрами рассматриваемой системы: k_γ и ε_α . Например, если $k_\gamma + \varepsilon_\alpha < 2$ и $\varepsilon_\alpha - 1 < k_\gamma$, то для первого периода на основе (2), (3), (4) получим:

$$k_c(\varphi_1) = \begin{cases} 3 & \text{при } 0 \leq \varphi_1/\tau_1 < \varepsilon_\alpha - 1; \\ 2 & \text{при } \varepsilon_\alpha - 1 \leq \varphi_1/\tau_1 < k; \\ 3 & \text{при } k \leq \varphi_1/\tau_1 < k + \varepsilon_\alpha - 1; \\ 2 & \text{при } k + \varepsilon_\alpha - 1 \leq \varphi_1/\tau_1 < 1. \end{cases} \quad (5)$$

Чередование чисел пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении, в пределах периода происходит по закону: 3-2-3-2.

Аналогично можно рассмотреть и другие варианты соотношений между параметрами k_γ и ε_α . На рис. 5, а приведены области значений параметров k_γ и ε_α , обеспечивающих реализацию того или иного закона чередования пар зубьев, находящихся в зацеплении, для скорректированных зубчатых передач, на рис. 5, б – для передач с нулевыми зубчатыми колесами.

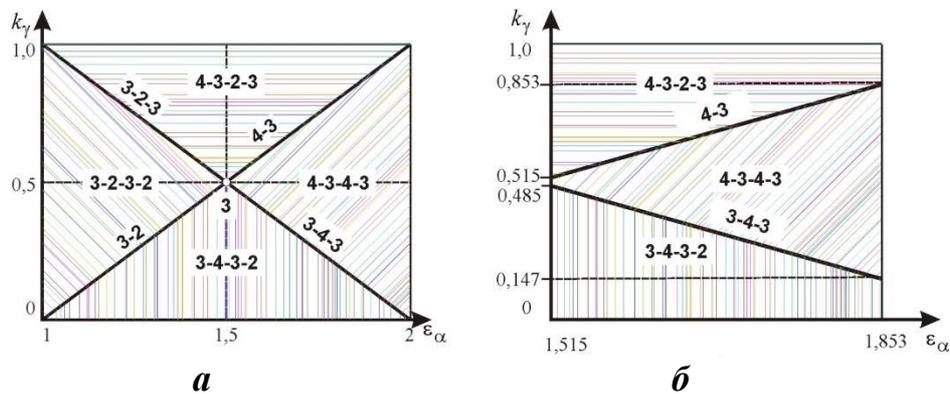


Рис. 5. Области существования режимов пересопряжения зубьев:
 а – для скорректированных зубчатых передач;
 б – для нескорректированных зубчатых передач

На рис. 6 приведены примеры графиков функции $k_c(\varphi_1)$.

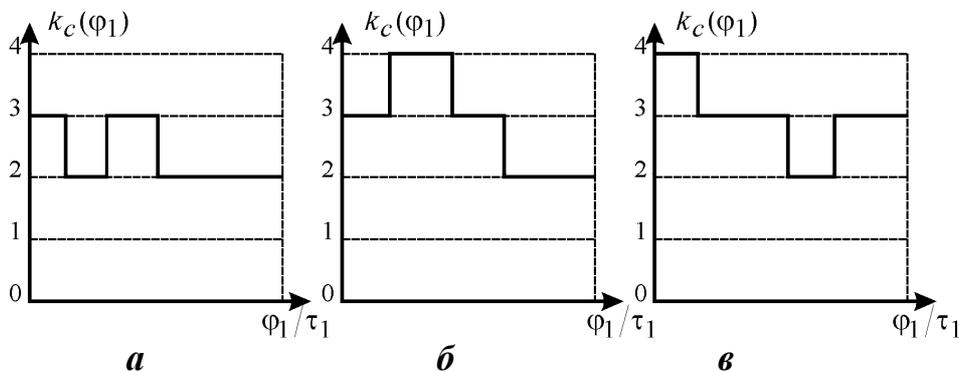


Рис. 6. Варианты пересопряжения зубьев в двухпоточной передаче:
 а – $\varepsilon_\alpha = 1,1$, $k_\gamma = 0,2$; б – $\varepsilon_\alpha = 1,6$, $k_\gamma = 0,3$; в – $\varepsilon_\alpha = 1,5$, $k_\gamma = 0,8$

Многопарность зацепления позволяет повысить нагрузочную способность зубчатых передач. В работе [20] для оценки снижения нагрузки на одну пару зубьев в многопоточной планетарной зубчатой передаче предложен коэффициент $k_F = \epsilon_\alpha k_K$, который представляет собой среднее число пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении за один период. При расчете на прочность необходимо округлять его до ближайшего меньшего целого числа, которое будет представлять минимальное число пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении. Как и любое среднее значение, этот коэффициент является интегральной характеристикой и не дает полной характеристики протекающих в системе динамических процессов. Предлагаемая функция $k_c(\varphi_1)$ обладает в этом смысле значительно большей информативностью.

Кроме того, в некоторых случаях использование этого коэффициента может привести к фактическим ошибкам. Например, при $\epsilon_\alpha = 1,6$; $k_K = 2$, $k_\gamma = 0,3$ предлагаемый коэффициент $k_F = 3,2$ и соответственно минимальное число пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении, принимается равным трем. В действительности пересопряжение зубьев происходит по закону: 3-4-3-2, и минимальное число пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении, равно 2 (см. рис. 6, б). В синфазной передаче зубья чередуются по закону 4-2.

Полученные зависимости вида (5) и построенные на их основе области существования режимов пересопряжения зубьев (см. рис. 5) позволяют наглядно представить процесс пересопряжения в двухпоточной передаче при известных коэффициенте перекрытия ϵ_α и коэффициенте фазового сдвига k_γ . Для практических целей более интересно иметь зависимости режимов пересопряжения от исходных параметров передачи: чисел зубьев и коэффициентов смещения зубчатых колес.

Вид функции, определяющей коэффициент силовой многопоточности, будет зависеть от пяти параметров $k_c = k_c(z_1, z_2, x_1, x_2, k_\gamma, \varphi_1)$, что не позволяет построить наглядную графическую иллюстрацию. На основе зависимостей (1)-(5) была разработана программа, которая позволяет строить график функции $k_c(\varphi_1)$ при заданных $z_1, z_2, x_1, x_2, k_\gamma$. Некоторые примеры расчета по этой программе приведены в таблице.

Примеры определения режимов пересопряжения зубьев по исходным параметрам передачи

z_1	z_2	x_1	x_2	k_γ	$k_c(\varphi_1)$
17	20	0	0	0,2	<p>$f(\epsilon_\alpha(x_1, x_2, z_1, z_2), kt, tt)$</p>

Окончание таблицы

z_1	z_2	x_1	x_2	k_γ	$k_c(\varphi_1)$
12	20	0,5	0	0,4	
50	250	-0,4	0,4	0,6	

Для некорректированных зубчатых передач число независимых параметров уменьшается до трех: z_1 , z_2 , k_γ , что позволяет построить области существования режимов на плоскости z_1 , z_2 для заданного k_γ .

При $k_\gamma < 0,147$ чередование зацепления происходит по закону 3-4-3-2, а при $k_\gamma > 0,853$ – по закону 4-3-2-3 независимо от чисел зубьев зубчатых колес. Оба эти варианта неудачны с точки зрения нагрузочной способности, т.к. в определенные моменты времени в зацеплении будут находиться только две пары зубьев. При $0,485 < k_\gamma < 0,515$ чередование происходит по закону 4-3-4-3; в зацеплении находится не менее трех пар зубьев.

При $0,147 < k_\gamma < 0,485$ возможны законы 3-4-3-2 и 4-3-4-3, а при $0,515 < k_\gamma < 0,853$ – законы 3-4-3-2 и 4-3-4-3. Уравнения кривых, разделяющих соответствующие области, имеют вид: $\varepsilon_\alpha(z_1, z_2) = 2 - k_\gamma$ в первом случае и $\varepsilon_\alpha(z_1, z_2) = k_\gamma + 1$ во втором случае. Примеры соответствующих областей приведены на рис. 7.

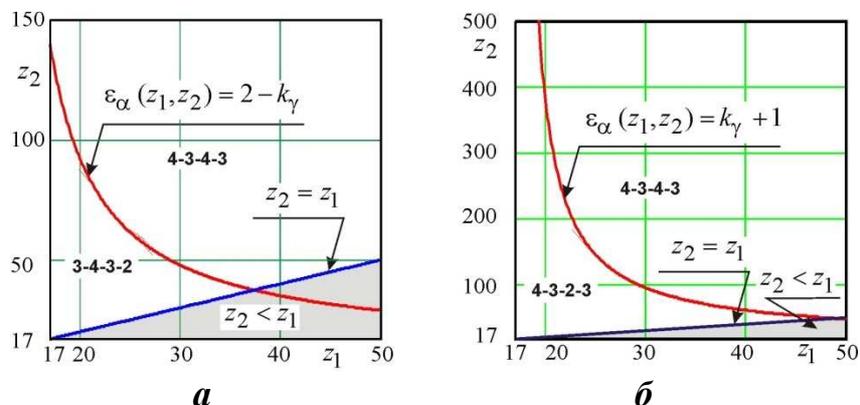


Рис. 7. Области существования режимов пересопряжения в зависимости от чисел зубьев: а – $k_\gamma = 0,3$; б – $k_\gamma = 0,75$

Заключение. Введение фазового сдвига в двухпоточной передаче позволяет изменять порядок пересопряжения зубьев в параллельных кинематических цепях и влиять на динамические процессы, протекающие в системе. Анализ режимов пересопряжения зубьев и влияния на них параметров передачи позволил сделать следующие выводы:

- для синфазных передач число пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении, меняется по закону 4-2;

- в асинфазных передачах порядок пересопряжения зубьев зависит от коэффициента перекрытия и коэффициента фазового сдвига. При принятых значениях параметров передачи число пар зубьев, одновременно находящихся в зацеплении, может меняться от двух до четырех;

- наиболее благоприятный динамический режим обеспечивается в асинфазных передачах при $\epsilon_\alpha = 1,5$ и $k_\gamma = 0,5$. В этом случае в зацеплении постоянно находятся три пары зубьев;

- в асинфазных зубчатых передачах с корригированными зубчатыми колесами наименьшая нагрузка на зубья обеспечивается при $\epsilon_\alpha > 1,5$ и угле фазового сдвига, соответствующего $2 - \epsilon_\alpha < k_\gamma < \epsilon_\alpha - 1$ (в этом случае чередование пар зубьев в зацеплении происходит по закону 4-3-4-3);

- в асинфазных зубчатых передачах с нулевыми зубчатыми колесами в принятом диапазоне изменения чисел зубьев $\epsilon_\alpha \geq 1,515$ и наименьшая нагрузка на зубья независимо от чисел зубьев колес будет обеспечиваться при угле фазового сдвига, соответствующего $2 - \epsilon_\alpha < k_\gamma < \epsilon_\alpha - 1$;

- разработанная на основе полученных аналитических зависимостей программа позволяет определять режим пересопряжения зубьев по исходным параметрам передачи: числам зубьев и коэффициентам смещения зубчатых колес.

Список литературы

1. Крюков В.А., Ктиторов Д.А., Сидоров П.Г. Особенности протекания динамических процессов в нелинейных электромеханических системах // Проблемы механики современных машин: Материалы V международной конференции: В 3 т. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. Т. 2. С. 223-226.

2. Тимофеев Г.А., Люминарский И.Е., Люминарская Е.С. Динамический анализ и синтез механизмов с учетом механической характеристики асинхронного электродвигателя // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 5 (65). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-5-1613.

3. Тимофеев Г.А., Кузенков В.В. Особенности динамики следящего привода с волновой зубчатой передачей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С. 34-41.

4. Крюков В.А. Динамические процессы в приводах сложных взаимосвязанных машинных агрегатов // *Вибрационные машины и технологии: сб. науч. тр. Курск: Курск. гос. тех. ун-т, 2008. С. 485-493.*
5. Крюков В.А. Моделирование динамики привода транспортного движения автоматических роторных линий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып.11. Ч.2. С. 528-535.*
6. Крюков В.А., Ктиторов Д.А. Уточненная математическая модель червячной кинематической пары // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 10. С. 297-305.*
7. Крюков В.А., Прейс В.В. Моделирование движения червячного привода автоматических роторных линий // *Машиностроение и техносфера XXI века: сб. труд. XII международной научно-технической конференции В 5-х т. Донецк: ДонНТУ, 2005. Т. 2. С. 155-158.*
8. Динамика приводов технологических машин с самотормозящимися механизмами: в 5-ти ч. / В.Л. Вейц [и др.]. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2002.
9. Кузенков В.В., Тимофеев Г.А., Фурсяк Ф.И. Динамика инерционных конвейеров // *Подъёмно-транспортное дело. 2010. № 3. С. 2-4.*
10. Динамика цилиндрической зубчатой передачи / Г.Н. Макаров [и др.] // *Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 4 (40). С. 48-51.*
11. Малинкович М.Д. Исследование процесса зацепления цилиндрических зубчатых передач // *Вестник Брянского государственного технического университета. 2008. № 3 (19). С. 32-37.*
12. Калинин Д.В., Темис Ю.М. Динамическая модель планетарного редуктора турбореактивных двухконтурных двигателей // *Известия вузов. Машиностроение. 2017. № 3 (684). С. 66-75.*
13. Насонов Д.А., Леонтьев М.Ю. Моделирование динамических процессов, вызванных пересопряжением зубьев в планетарных редукторах // *Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. научн. статей по материалам XII Международной научно-технической конференции: в 2-х ч. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. Ч. 1. С. 252-256.*
14. Dynamic optimization of spur gears / M. Faggioni [et al.] // *Mechanism and Machine Theory. 2011. # 46. P. 544-557.*
15. Hiroaki Y., Nader S. Gearbox simulation models with gear and bearing faults // *Mechanical engineering / M. Gökçek (ed). Rijeka: InTech. P. 17–54.*
16. Amabili M., Rivola A. Dynamic analysis of spur gear pairs: steady-state response and stability of the SDOF model with time-varying meshing damping // *Mechanical Systems and Signal Processing. 1997. # 11 (3). P. 264-289.*
17. Вейц В.Л., Коловский М.З., Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. М.: Наука, 1984. 352 с.

18. Крюков В.А., Савельева Л.В. Снижение динамических нагрузок в многопоточных передачах // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. научн. статей по материалам XII Международной научно-технической конференции: в 2-х ч. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. Ч. 1. С. 205-215.

19. Силовые зубчатые трансмиссии угольных комбайнов / П.Г. Сидоров [и др.]. М.: Машиностроение, 1995. 296 с.

20. Сидоров П.Г., Пашин А.А., Плясов А.В. Многопоточные зубчатые трансмиссии: теория и методология проектирования. М. Машиностроение, 2011. 340 с.

21. Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин. Учебник и практикум. М.: Изд-во Юрайт, 2017. 429 с. (Сер. 60. Бакалавр. Прикладной курс).

22. Планетарные передачи: Справочник / В.Н. Кудрявцев [и др.]. Л.: Машиностроение, 1977. 536 с.

23. Анфимов М.И. Редукторы. Конструкции и расчет. М.: Машиностроение. 1993, 463 с.

24. Мельников В.З. Зубчатые передачи с многопарным зацеплением. М.: МГИУ, 2006. 60 с.

25. Скойбеда А.Т., Супин В.В. Мельников В.З. Повышение нагрузочной способности зубчатых передач тракторов «Беларус» посредством применения многопарного зацепления // Известия национальной Академии наук Беларуси. Серия аграрных наук. 2011. № 4. С. 107-111.

26. Мельников В.З. Обеспечение качества зубчатых передач на основе реализации многопарного зацепления // Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 1 (34). С. 2-8.

27. Теория механизмов и механика машин / Г.А. Тимофеев [и др.]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 568 с.

28. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. М.: Машиностроение, 1979. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. 1979. 351 с.

29. ГОСТ 16532-70. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии. М., 1983. 119 с.

30. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач / И.А. Болотовский [и др.]. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.

31. Gleason [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gleason.com> (дата обращения 15.07.2018).

32. Gleason. Cylindrical Gear Solutions [Электронный ресурс]. URL: <http://produkttech.com/wp-content/uploads/Gleason-katalog.pdf> (дата обращения 15.07.2018).

33. Группа компаний ФИНВАЛ. Зубообрабатывающее оборудование и инструмент. Каталог продукции. 2018. 180 с.

34. Mechanical Engineering / М. Gökçek (ed.). Rijeka: In Tech, 2012. 681 p.

35. Вулгаков Э.Б. Теория эвольвентных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1995. 320 с.

Крюков Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, va.krukov@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Савельева Людмила Валентиновна, соискатель, pmdm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**THE CHARACTERISTICS OF THE OUT-OF-PHASE MOTION
IN TWO-STREAM SPUR GEAR**

V.A. Krukov, L.V. Savelieva

The modes of teeth meshing in two-stream spur gear are considered. Areas of existence of different modes and the possibility of the formation of the desired modes in out-of-phase transmissions are determined.

Key words: gears, dynamics, simulation, multistream transmission, dual stream transmission, out-of-phase transmission.

Krukov Vladimir Alekseevich, doctor of technical science, professor, va.krukov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Savelieva Ludmila Valentinovna, candidate for a degree, pmdm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 621.798.34

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ ГИБКИМ КОНТЕЙНЕРОМ

А.М. Макаров, О.В. Мушкин, П.В. Дикарев, М.А. Лапиков

Исследован процесс автоматического манипулирования гибким контейнером при наполнении сыпучим материалом. Разработаны математические модели, описывающие форму горловины гибкого контейнера при различных схемах его захвата. Для оценки их адекватности разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая фотографировать форму горловины гибкого контейнера в момент его захвата. Результаты экспериментальных исследований сходятся с теоретическими расчетами.

Ключевые слова: автоматическое манипулирование; машинное зрение; гибкий контейнер; горловина; предварительное открытие; управление.

Эффективность расфасовки сыпучих материалов в различные виды тары, в том числе в гибкие контейнеры (ГК), во многом зависит от эффективности (точности, скорости, надежности) процесса манипулирования этой тарой при ее открытии, удержании при наполнении и последующем закрытии и упаковке. Именно процесс манипулирования гибким контейнером при наполнении обычно проходит с участием человека. Для полной автоматизации таких систем предложен ряд устройств [1-3]. Математическое и компьютерное моделирование этих устройств [4-5] а также результаты экспериментального исследования [5-7] подтверждают их работоспособность и применимость в данной области.

Для автоматического манипулирования гибкими контейнерами при наполнении сыпучим материалом могут использоваться различные типы хватных устройств и способы захвата. При захвате гибкого контейнера с внутренней стороны его горловины, например, с помощью вакуумных хватных устройств (ВЗУ), для последующего раскрытия, удержания при наполнении и закрытия для закупоривания важную роль играет правильность и точность предварительного открытия гибкого контейнера в усло-

виях изменяющихся внешних воздействий (отклонение положения гибкого контейнера от заданного на позиции захвата, адгезия стенок горловины ГК, непостоянная степень разряжения в вакуумном захватном устройстве, неравномерная воздухопроницаемость материала ГК и др.). Произведем теоретическую и экспериментальную оценку правильности предварительного открытия гибкого контейнера с помощью ВЗУ.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых - кандидатов наук МК-2619.2017.8.

Материалы и методы исследования.

При теоретическом исследовании процесса захвата и предварительного открытия гибких контейнеров с помощью захватных устройств могут быть рассмотрены 2 основные расчетные схемы, представленные на рис. 1.

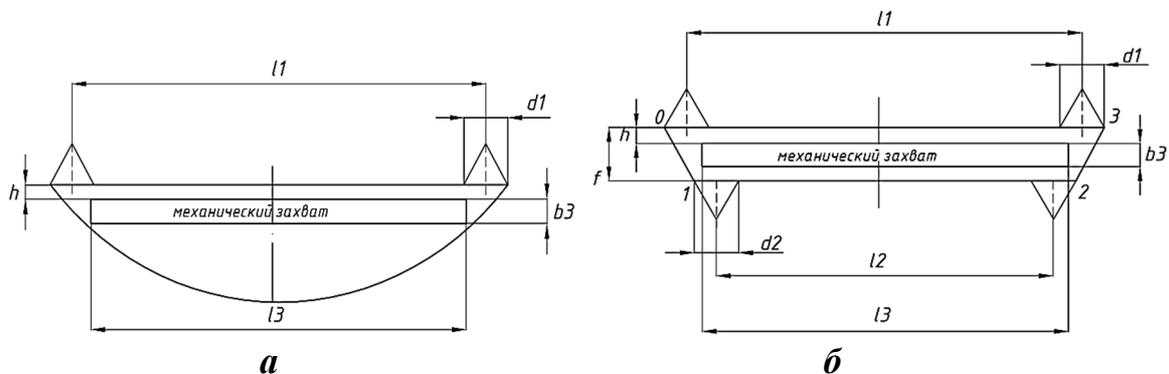


Рис. 1. Расчетные схемы для исследования захвата и предварительного открытия гибких контейнеров: а – захват и удержание только сверху; б – захват и удержание сверху и снизу

На рис. 1 приняты следующие обозначения: l_1 и l_2 – расстояние между центрами крайних вакуумных камер, расположенных сверху и снизу соответственно, d_1 и d_2 – диаметр верхних и нижних вакуумных камер, b_3 и l_3 – линейные размеры (высота и ширина) механического захвата, свободно располагаемого внутри открытой полости горловины, h – зазор между верхней частью горловины ГК и механическим захватом, f – величина вертикального перемещения верхнего ВЗУ.

В первом случае (рис. 1, а) захват и удержание гибкого контейнера происходит только с верхней стороны его горловины. При этом расстояние между крайними точками удержания составляет $(l_1 + d_1)$. В этом случае нижняя часть горловины провисает. Вывод кривой провисания горловины гибкого контейнера с использованием методов вариационного исчисления представлен в [1]. Она имеет форму, близкую параболе и может быть описана уравнением:

$$y = C_1 \operatorname{ch} \frac{x - C_2}{C_1} - \lambda,$$

где $\text{ch}(z)$ – гиперболический косинус функции, C_1, C_2 – произвольные постоянные интегрирования, значения которых устанавливаются из граничных условий для конкретных величин длины горловины гибкого контейнера $L_g=2B$, где B – ширина ГК и расстояния между крайними точками удержания l_1+d_1 решением системы уравнений для точек подвеса ГК при длине провисшей части $L_g - (l_1+d_1)$. Постоянные интегрирования C_1, C_2 и неопределенный множитель λ для частного случая, представленного на рис. 1а могут быть определены из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} C_1 \text{ch} \frac{-C_2}{C_1} - \lambda = 0; & (\text{при } x = 0 \rightarrow y = 0) - \text{левая крайняя точка подвеса} \\ C_1 \text{ch} \frac{(l_1 + d_1) - C_2}{C_1} - \lambda = 0; & (\text{при } x = (l_1 + d_1) \rightarrow y = 0) - \text{правая крайняя точка} \\ C_1 \left(\text{sh} \frac{(l_1 + d_1) - C_2}{C_1} - \text{sh} \frac{-C_2}{C_1} \right) = 2B - (l_1 + d_1). \end{cases}$$

Например, при удержании горловины стандартного полипропиленового гибкого контейнера шириной $B=560$ мм при заданном расстоянии между внешними краями вакуумных захватов $(l_1+d_1) = 530$ мм, уравнение кривой провисания нижней части горловины ГК принимает следующий вид

$$y = 327 \text{ch} \frac{x - 265}{327} - 440 \text{ (мм)}.$$

В случае предварительного открытия гибкого контейнера путем захвата и удержания его горловины сверху и снизу (расчетная схема на рис. 1 б), она принимает форму трапеции. Характерные точки имеют следующие координаты:

$$\begin{aligned} x_0 = 0, \quad y_0 = 0; \quad x_1 = a_1, \quad x_2 = l_1 + d_1 - a_1; \\ x_3 = l_1 + d_1, \quad y_1 = -f, \quad y_2 = -f, \quad y_3 = 0, \end{aligned}$$

где a_1 определяется из выражения

$$a_1 = \frac{(l_1 + d_1) - (l_2 + d_2)}{2}.$$

При этом уравнения, описывающие форму горловины ГК (прямые между характерными точками), имеют вид:

$$\text{при } 0 \leq x \leq a_1 \rightarrow y = -\frac{f}{a_1} x,$$

$$\text{при } a_1 \leq x \leq l_1 + d_1 - a_1 \rightarrow y = -f,$$

$$\text{при } l_1 + d_1 - a_1 \leq x \leq l_1 + d_1 \rightarrow y = \frac{f}{a_1} x - \frac{f(l_1 + d_1)}{a_1} = \frac{f}{a_1} (x - l_1 - d_1).$$

Если принять следующие начальные условия: $B=550$ мм, $d_1=d_2=20$ мм, $l_1=470$ мм, $l_2=170$ мм и $f=145$ мм, тогда уравнения, определяющие форму горловины для второй расчетной схемы, будут иметь вид:

$$\text{при } 0 \leq x \leq 150 \rightarrow y = -\frac{145}{150}x = -\frac{29}{30}x,$$

$$\text{при } 150 \leq x \leq 340 \rightarrow y = -145,$$

$$\text{при } 340 \leq x \leq 490 \rightarrow y = \frac{145}{150}(x - 470 - 20) = \frac{29}{30}(x - 490).$$

Для экспериментальной оценки полученных теоретических зависимостей спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая исследовать форму горловины гибкого контейнера при его открытии в автоматизированном режиме с использованием аппарата распознавания изображений, имеющего большую актуальность и востребованность в настоящее время [8, 9]. Схема комбинированная структурная лабораторной установки с автоматической системой управления представлена на рис. 2.

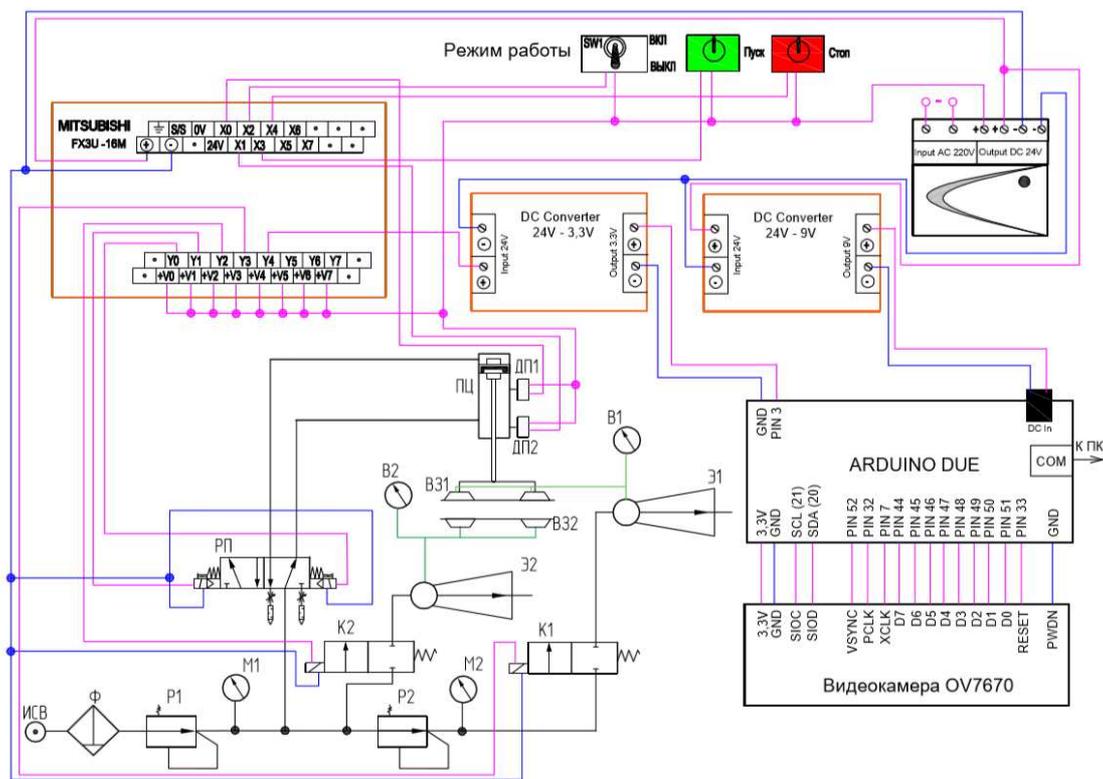


Рис. 2. Структурная схема лабораторной установки: ИСВ – источник сжатого воздуха; Φ – фильтр; P – регулятор давления; M – манометр; РП – электронневмораспределитель; ПЦ – пневмоцилиндр; K – клапан; Э – эжектор; B – вакуумметр; B3 – вакуумное захватное устройство; ДП – датчик положения

В качестве источника информации о ходе процесса манипулирования гибким контейнером, а именно, правильности его захвата из горизонтального положения на позиции захвата и предварительного открытия гор-

ловины с помощью вакуумных захватных устройств (ВЗУ), используется фотоизображение процесса в заданные моменты времени. По обработанным фотографиям делается заключение о правильности предварительного открытия и форме горловины ГК.

На рис. 3 представлен общий вид лабораторной установки.

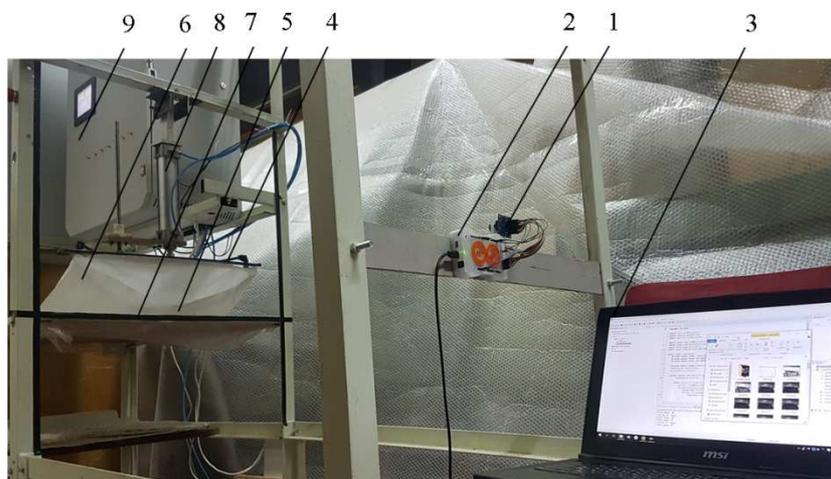


Рис. 3. Общий вид лабораторной установки: 1 – VGA видеокамера; 2 – микроконтроллер на базе Arduino DUE; 3 – ноутбук; 4, 5 – ВЗУ; 6 – гибкий контейнер; 7 – стол; 8 – пневмоцилиндр; 9 – шкаф управления

Экспериментальная установка содержит модуль VGA видеокамеры 1 модели OV7670 с максимальным разрешением 640x480 пикселей, изображение с которой обрабатывается с помощью микроконтроллера Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 на базе аппаратной платформы Arduino DUE 2, и с помощью специализированного программного обеспечения передается на ЭВМ 3 (ноутбук MSI G162m).

Объектив видеокамеры сфокусирован на рабочей области, в которой расположены два вакуумных захватных устройства 4 и 5 и гибкий контейнер 6, лежащий на столе 7.

ВЗУ 4 состоит из нескольких (не менее двух) вакуумных камер с возможностью изменения расстояния между крайними боковыми из них и выполнен с возможностью вертикального возвратно-поступательного перемещения с помощью пневмоцилиндра 8 типа 60M2L040A0150 компании Camozzi.

ВЗУ 5 состоит из двух вакуумных камер, смонтированных в стол 7 на заданном расстоянии. Управление движением ВЗУ 4 осуществляется от электропневмораспределителя 358-011-02 (5/2, расход 700 Нл/мин), а управление подачей вакуума в вакуумные камеры захватов 4 и 5 осуществляется от электропневмораспределителей (клапанов) 623-15E-A6 (2/2, расход 220 Нл/мин) и эжекторов SCV-20СК (разряжение до -53.2 Кпа,

расход до 180 Нл/мин), связанных с системой подачи подготовленного сжатого воздуха. Управление последовательностью действий при проведении эксперимента осуществляется от программируемого логического контроллера (ПЛК) FX3U-16MT/DSS компании Mitsubishi Electric и блока питания Alpha Power 24-2.5.

Проведение экспериментальных исследований на лабораторной установке может осуществляться на основе 2 расчетных схем: захват и предварительное открытие гибкого контейнера с помощью одного вакуумного захвата 4, расположенного над гибким контейнером, или захват и предварительное открытие гибкого контейнера с помощью двух вакуумных захватов 4 и 5, расположенных над гибким контейнером и под ним. Выбор одного из двух режимов работе выполняется с помощью тумблера. После выбора расчетной схемы (положение тумблера) и нажатия кнопки «ПУСК» происходит опускание вакуумного захвата 4 до гибкого контейнера. Далее с помощью вакуумной машины создается пониженное давление в вакуумных камерах захвата 4 и захвата 5 (для второй расчетной схемы). Для контроля степени вакуума используется стрелочный вакуумметр. Открытие гибкого контейнера происходит при возвращении вакуумного захвата 4 в исходное положение. При этом подается сигнал с ПЛК через преобразователь 24В - 3.3В DC на микроконтроллер 2, видеочамера делает фотографию, которая через виртуальный com-порт передается на ноутбук 3. После фиксации видеочамерой формы горловины гибкого контейнера подача вакуума в вакуумные камеры прекращается и гибкий контейнер возвращается в исходное положение. Цикл экспериментов повторяется, пока не будет нажата кнопка «СТОП».

Исследования проводились при следующих исходных данных:

1. размеры гибкого контейнера, плетеного из полипропиленовой нити: длина 1050 мм, ширина $B=550$ мм;
2. диаметр вакуумных камер верхнего ВЗУ $d_1=20$ мм, расстояние между их центрами $l_1=470$ мм;
3. диаметр вакуумных камер нижнего ВЗУ $d_2=20$ мм, расстояние между их центрами $l_2=170$ мм;
4. ход поршня пневмоцилиндра с верхним ВЗУ $f=145$ мм.

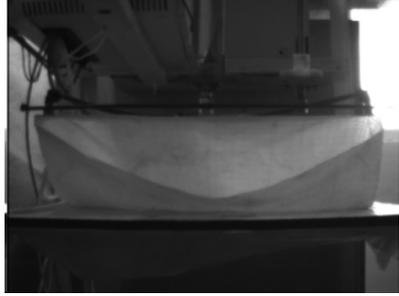
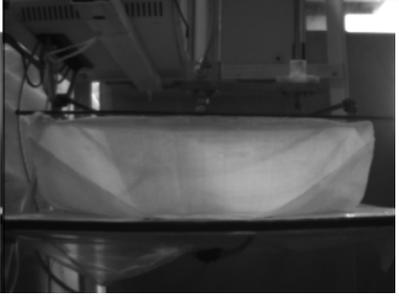
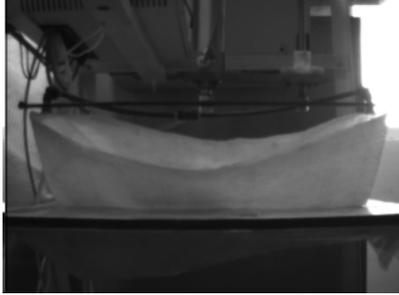
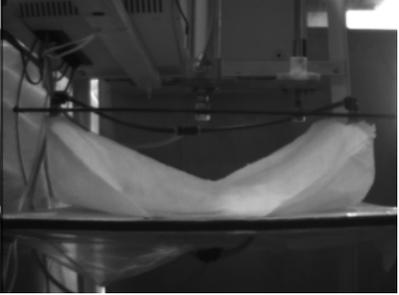
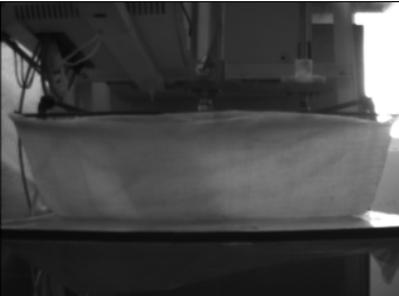
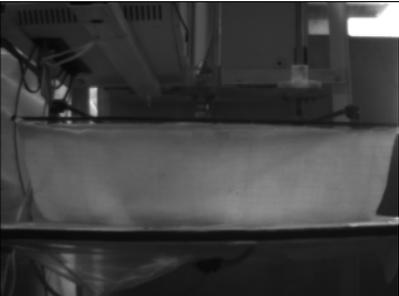
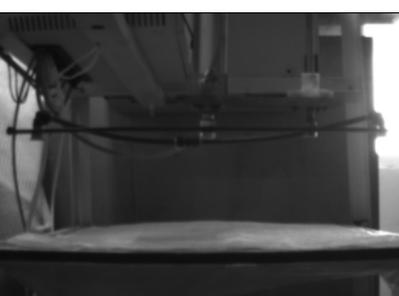
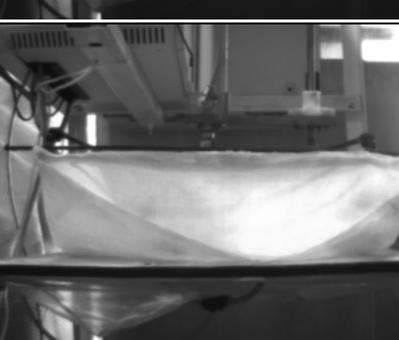
Фотографии передавались на ЭВМ и обрабатывались. После чего делалось заключение о правильности предварительного открытия гибкого контейнера и соответствии результатов эксперимента теоретическим исследованиям.

Результаты и их обсуждение.

В результате эксперимента по предварительному открытию гибкого контейнера согласно первой расчетной схеме получена серия фотографий, которые были классифицированы на несколько групп и сведены в таблицу.

Результаты исследования показали, что для первой схемы, когда гибкий контейнер захватывается и удерживается только с верхней стороны, достаточно высока вероятность неправильного раскрытия гибкого контейнера (более 10% неудачных или неправильных захватов).

Классификация результатов исследования для различных схем удержания

№	Захват сверху (1)	Захват сверху и снизу (2)	Классификация
1			Правильно раскрыт
2			Неправильно раскрыт
3			Не раскрыт
4			Не захвачен
5			Захвачен не всеми ВЗУ

Это особо ярко выражено при использовании новых ГК, часто обладающих эффектом слипания двух его половин. При анализе успешных опытов выявлено некоторое расхождение между экспериментальной и теоретической формой открытой горловины. Оно связано с определенной жесткостью материала ГК и не имеет значительного влияния на успешность последующего его захвата изнутри с помощью, например, механического захватного устройства, если его габаритные размеры не заданную величину, зависящую от расстояния между крайними точками удержания (l_1+d_1).

При анализе второй схемы захвата (сверху и снизу) выявлено, что для надежного захвата, открытия и удержания гибкого контейнера необходимо подбирать расстояния (l_1+d_1) и (l_2+d_2) таким образом, чтобы суммарная длина кривой 0-1-2-3-0 (рис. 1б) была меньше длины горловины ГК на величину $(0,05 \dots 0,1)B$. Это также связано с жесткостью материала гибкого контейнера. Несоблюдение этого условия приводит к возрастанию вероятности захвата ГК не всеми вакуумными камерами ВЗУ, а значит и неправильного его открытия. Эта проблема может быть решена созданием большего разряжения в вакуумных камерах захватных устройств, однако это приводит к снижению энергоэффективности устройства. Для второй расчетной схемы открытая внутренняя полость горловины больше, чем для первой схемы, а надежность захвата и удержания гибкого контейнера выше.

Выводы. Для решения задачи автоматического захвата ГК, его раскрытия, удержания при наполнении сыпучим материалом и закрытия могут быть использованы разработанные захватные устройства [1-3].

Были проведены теоретические исследования, посвященные изучению процесса захвата и предварительного открытия гибких контейнеров. Рассмотрены 2 основные расчетные схемы: 1) захват и удержание гибкого контейнера происходит только с верхней стороны его горловины; 2) предварительное открытие горловины гибкого контейнера путем захвата и удержания его горловины сверху и снизу. Полученные в ходе теоретических исследований результаты были подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Для диагностики правильности предварительного открытия гибкого контейнера может быть использован специализированный алгоритм, позволяющий по фотографии горловины, преобразуя ее и сравнивая с теоретическими зависимостями, судить о правильности предварительного открытия и удержания ГК для последующего захвата, и транспортировки на позицию наполнения. Интеграция такого алгоритма в существующие системы управления расфасовочным процессом позволит производить диагностику правильности предварительного открытия гибкого контейнера для наполнения сыпучим материалом непосредственно в ходе технологического процесса, что повысит его надежность, производительность и позволит снизить долю брака при эксплуатации расфасовочного оборудования.

Список литературы

1. Макаров А.М., Сердобинцев Ю.П., Крылов Е.Г. Автоматизация наполнения гибких контейнеров сыпучими продуктами // СТИН, 2014. № 4. С. 37-40.

2. Патент 155000 РФ. МПК В65В5/00, В65В7/02. Устройство для автоматического раскрытия, удержания и закрытия гибких контейнеров / А.М. Макаров, М.Г. Кристаль, А.А. Ковалев, Д.А. Сулейманов. 2015.

3. Патент 169411 РФ. МПК В65В67/12 Устройство для автоматического захвата, раскрытия и удержания гибких контейнеров / А.М. Макаров, М.А. Лапиков, О.В. Мушкин, Ю.П. Сердобинцев. 2017.

4. Компьютерное моделирование процесса расфасовки сыпучих материалов в открытую мягкую тару / А.М. Макаров, В.Ф. Кучинский, О.В. Мушкин, М.А. Лапиков // Известия ВолгГТУ. Серия. Прогрессивные технологии в машиностроении. 2016. № 8 (187). С. 79-81.

5. Моделирование и исследование автоматических устройств для манипулирования гибкими контейнерами при наполнении сыпучим материалом / А.М. Макаров, Ю.П. Сердобинцев, О.В. Мушкин, М.А. Лапиков // XX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2017) (г. Санкт-Петербург, 24-26 мая 2017 г.) : [сб. докл.]. Секция 2. Моделирование систем. Управление сложными объектами в условиях неопределённости / Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Российская Северо-Западная секция IEEE, Научный совет по искусственному интеллекту РАН [и др.]. Санкт-Петербург, 2017. С. 346-349.

6. Макаров А.М., Сердобинцев Ю.П., Сергеев А.С. Исследование устройства для автоматического наполнения гибких контейнеров сыпучим материалом // Известия ВолгГТУ. Серия. Прогрессивные технологии в машиностроении. 2013. № 20 (123). С. 114-117.

7. Исследование процесса автоматического захвата воздухопроницаемых гибких контейнеров с помощью вакуума при расфасовке сыпучих материалов [Электронный ресурс] / А.М. Макаров, Ю.П. Сердобинцев, О.В. Мушкин, М.А. Лапиков // Пром-Инжиниринг (The 3rd International Conference on Industrial Engineering 2017) : тр. III междунар. науч.-техн. конф. (г. Санкт-Петербург – г. Челябинск – г. Новочеркасск – г. Владивосток, 16-19 мая 2017 г.) / отв. ред.: А.А. Радионов; ФГАОУ ВО «Южно-Уральский гос. ун-т» (национальный исследовательский ун-т). Челябинск. 2017. С. 212-217.

8. Автоматизация исследования и отладки алгоритмов и программ обработки изображений / И.С. Дудко, А.И. Ефимов, А.А. Логинов, О.А. Ломтева, Е.Р. Муратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 9. Ч. 1. С. 87-95.

9. Конкин Ю.В., Колесенков А.Н. Распознавание изображений на основе текстурных признаков Харалика и искусственных нейронных сетей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 2. С. 117-123.

Макаров Алексей Михайлович, канд. техн. наук, доцент, amm34@mail.ru, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет,

Мушкин Олег Викторович, аспирант, olezhka_93@inbox.ru, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет,

Дикарев Павел Владимирович, магистрант, dikarev.pavel@mail.ru, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет,

Лапиков Максим Андреевич, магистрант, remax777@yandex.ru, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет

THE USE OF MACHINE VISION FOR AUTOMATIC MANIPULATION OF A FLEXIBLE CONTAINER FOR FILLING BULK MATERIAL

A.M. Makarov, O.V. Mushkin, P.V. Dikarev, M.A. Lapikov

The process of automatic manipulation of a flexible container when filling with bulk material is investigated. Mathematical models describing the shape of the flexible container neck under various schemes of its capture are developed. To assess their adequacy, an experimental setup was developed and manufactured, which allows photographing the shape of the flexible container's neck at the time of its capture. The results of experimental studies converge with theoretical calculations.

Key words: automatic manipulation; computer vision; flexible container; a neck; pre-opening; management.

Makarov Alexey Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, amm34@mail.ru, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University,

Mushkin Oleg Viktorovich, postgraduate, olezhka_93@inbox.ru, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University,

Dikarev Pave Vladimirovich, master student, dikarev.pavel@mail.ru, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University

Lapikov Maksim Andreevich, master student, remax777@yandex.ru, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 629.783

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

И.А. Фадин, С.В. Янов

Предложена модель, позволяющая на основе исходных данных о параметрах движения космических аппаратов-измерителей, космических объектов, Солнца и Луны определить пространственно-временные параметры наблюдения космических объектов.

Ключевые слова: мониторинг космической обстановки, модель, динамический метод космической триангуляции.

Активное использование космического пространства породило проблему его засорения [1]. Для безопасного использования орбитальных средств необходимо иметь и постоянно обновлять информацию о параметрах движения всех объектов (активных и выведенных из эксплуатации) в околоземном космическом пространстве (ОКП). С этой целью в настоящее время применяются средства системы контроля космического пространства (СККП). По состоянию на октябрь 2017 года отечественная СККП располагает лишь наземными средствами [2], а СККП США использует данные всего одного канадского КА «Сапфир» [3]. Однако, если Соединённые Штаты имеют наземные комплексы по всей территории Земного шара [3], обеспечивая тем самым высокий уровень глобальности покрытия ОКП и оперативности получения информации об изменении обстановки в космическом пространстве, то средства СККП РФ располагаются только на территории России и стран ближнего зарубежья [2].

Таким образом, существует объективное противоречие между потребностью в оперативно обновляемой информации об обстановке в ОКП и невозможностью создания глобальной СККП на основе только наземных средств.

Одним из способов разрешения указанного противоречия является создание орбитальной системы мониторинга космической обстановки (ОСМКО).

Вопросам создания данной системы посвящены труды Половникова В.И., Скутницкого В.М., Койнаша Б.М. и др. [4–6].

В основе работы ОСМКО лежит метод космической триангуляции [4, 5], согласно которому определение параметров движения космического объекта (КО) осуществляется в зонах двойного обзора бортовой оптико-электронной аппаратуры (БОЭА) космического аппарата-измерителя (КАИ) путём построения треугольника, в котором известны одна сторона (расстояние между двумя КАИ) и два угла (направления с двух КАИ на КО).

Однако в представленных выше работах используется метод космической триангуляции, при котором построение зон двойного обзора осуществляется между двумя фиксированными КАИ. Как показали результаты моделирования, формирование зон двойного обзора между КА, движущимися в разных орбитальных плоскостях (далее – динамического метода космической триангуляции), позволяет существенно повысить эффективность функционирования ОСМКО. Например, через зоны двойного обзора орбитальной системы мониторинга космической обстановки, состоящей из двух цепочек по 8 КА и функционирующей с использованием динамического метода космической триангуляции, за 30 минут проходит примерно 83% низкоорбитальных КО, а с использованием статического метода – 36%. Таким образом, тема работы, связанная с исследованием процесса функционирования ОСМКО, построенной с использованием динамического метода космической триангуляции, является актуальной.

Описание модели

Разработанная модель предназначена для определения пространственно-временных параметров функционирования ОСМКО, а именно ориентации линии визирования КАИ – КАИ при образовании зон двойного обзора в сферической системе координат (СК), связанной с бортом КАИ (рис. 1), предельных значений углов между линией визирования и направлением КАИ – КО, времён входа $t_{\text{ВХ}j}^k$ и выхода $t_{\text{ВЫХ}j}^k$ каждого j -го КО в зоны двойного обзора k , формируемые аппаратами с номерами i_{1j}^k, i_{2j}^k . Здесь $k = 1..K, j = 1..J$, где K – общее количество зон двойного обзора, образуемых за время моделирования, J – общее количество космических объектов.

Фундаментальная плоскость выбранной СК перпендикулярна \overline{OA} ; положительные направления отсчёта λ и φ указаны на рисунке; начало отсчёта азимутального угла (АС) – есть линия пересечения плоскости орбиты КА-измерителя с фундаментальной плоскостью выбранной СК. Для круговых орбит $\vec{v} \uparrow \uparrow \overline{AC}$.

На рис. 1 обозначено: \vec{v} – вектор скорости КАИ; О – центр Земли; А – точка нахождения КАИ на орбите; λ – азимутальный угол (долгота); φ – широта.

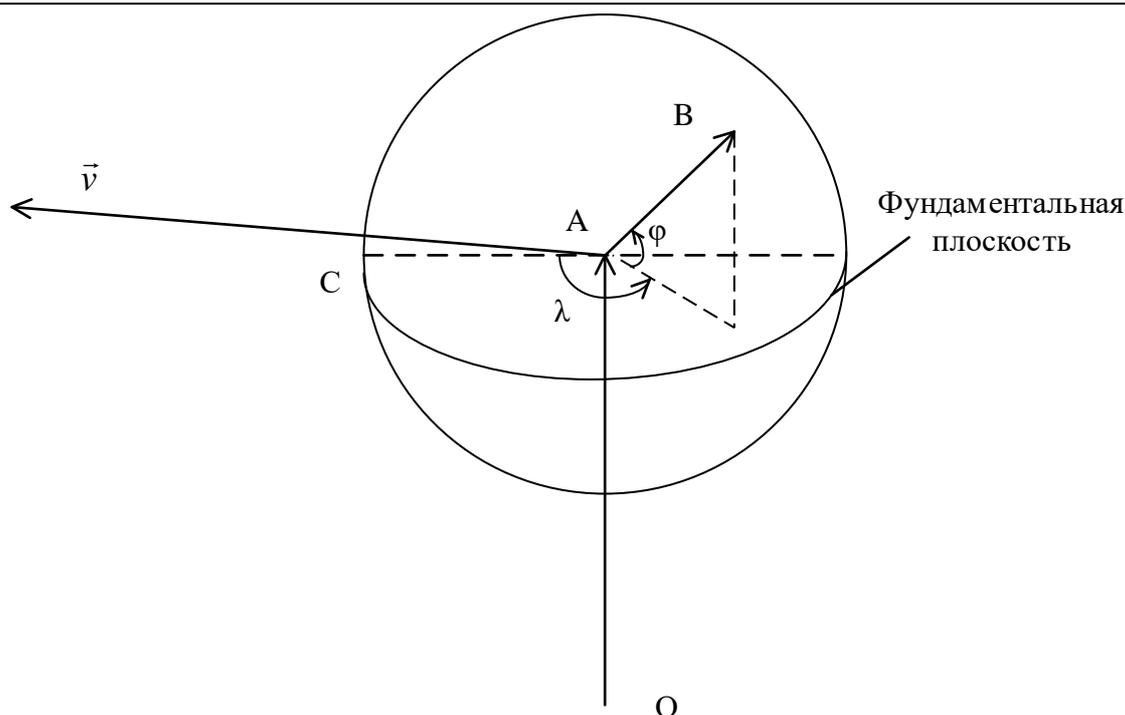


Рис. 1. Сферическая СК, используемая в модели

Структура модели функционирования орбитальной системы мониторинга космической обстановки представлена на рис. 2.

Входными данными модели являются:

временной интервал моделирования $\tau = [t_n, t_k]$, где t_n и t_k – время начала и окончания моделирования;

параметры движения КАИ $R_{КАИ} = \{\vec{r}_{КАИ_i}(t), i=1..I\}$, где $\vec{r}_{КАИ_i}(t)$ – радиус-вектор i -го КАИ на момент времени $t \in \tau$;

максимальная дальность обнаружения КО целевой аппаратурой КАИ $D_{сопр}$;

минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – Солнце, при котором не наступает засветка БОЭА $\alpha_{Сmin}$;

минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – Луна, при котором не наступает засветка БОЭА $\alpha_{Лmin}$;

минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – лимб Земли, при котором не наступает засветка БОЭА $\alpha_{Зmin}$;

параметры движения КО $R_{КО} = \{\vec{r}_{КО_j}(t), j=1..J\}$, где $\vec{r}_{КО_j}(t)$ – радиус-вектор j -го КО на момент времени $t \in \tau$;

положение Солнца на момент времени $t \in \tau$ $\vec{r}_С(t)$;

положение Луны на момент времени $t \in \tau$ $\vec{r}_Л(t)$.

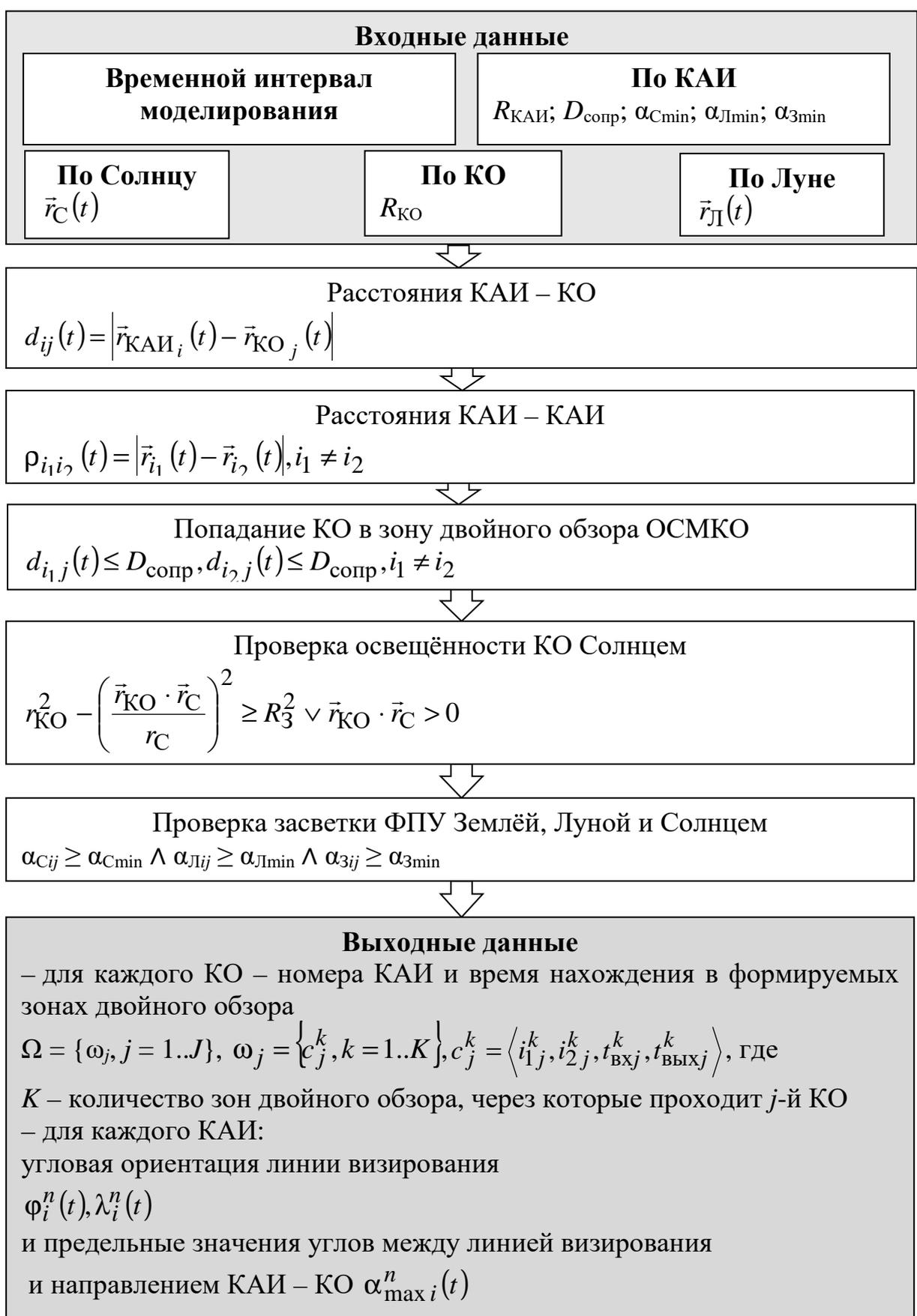


Рис. 2. Структура модели функционирования ОСМКО

Выходными данными являются:

– номера КАИ и времена нахождения КО в формируемых ими зонах двойного обзора;

угловые координаты линии визирования каждого КАИ при образовании зон двойного обзора ($\varphi_i^n(t), \lambda_i^n(t), n = 1..N_i$, где N_i – общее количество зон двойного обзора, образуемых i -ым КАИ за время τ);

предельные значения углов между линией визирования и направлением КАИ – КО – $\alpha_{\max i}^n(t)$. Графическая интерпретация $\alpha_{\max i}^n(t)$ представлена на рис. 3.

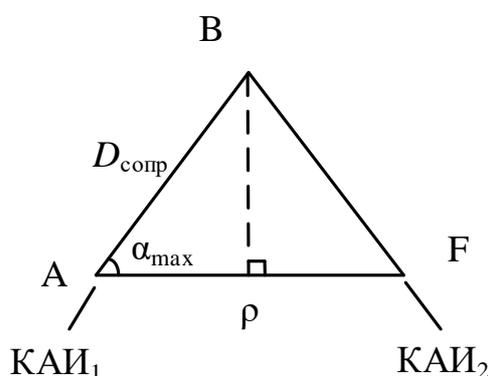


Рис. 3. К задаче определения предельного значения угла между линией визирования и направлением КАИ – КО

На рис. 3 точки А и F соответствуют двум КАИ, образующим зону двойного обзора, точка В – граница зоны двойного обзора. Из $\triangle ABF$

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{\rho}{2D_{\text{сопр}}} . \quad (1)$$

Для определения факта попадания КО в зону двойного обзора определяется расстояние между КАИ и КО $d_{ij}(t) = \left| \vec{r}_{\text{КАИ}_i}(t) - \vec{r}_{\text{КО}_j}(t) \right|$ в каждый момент времени. Если выполняются условия:

$$\begin{cases} d_{i_1 j}(t) \leq D_{\text{сопр}}; \\ d_{i_2 j}(t) \leq D_{\text{сопр}}, \end{cases}$$

для $i_1 \neq i_2$, то КО попадает в зону двойного обзора, образованную аппаратами с номерами i_1 и i_2 .

Так как БОЭА КАИ способна обнаружить лишь освещённые солнцем КО, то необходимо осуществить проверку освещённости последних (рис. 4).

При определении освещённости объекта предполагается, что тень Земли для низкоорбитальных объектов представляет собой цилиндр. Для попадания КО в теневой цилиндр необходимо одновременное выполнение двух условий:

$$\begin{cases} \vec{r}_{КО} \cdot \vec{r}_C < 0; \\ BD < R_3, \end{cases}$$

где R_3 – радиус Земли.

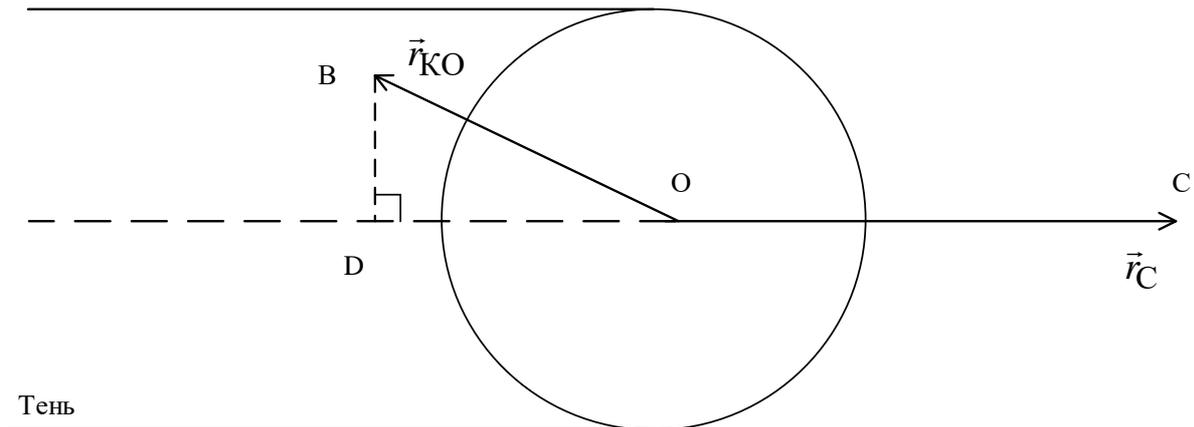


Рис. 4. К задаче определения освещённости КО: В – точка нахождения КО на орбите; С – направление на Солнце; О – центр Земли

В $\triangle BOD$

$$BD^2 = r_{КО}^2 - OD^2 = r_{КО}^2 - r_{КО}^2 \cos^2 \angle BOC. \quad (2)$$

В то же время,

$$\vec{r}_{КО} \cdot \vec{r}_C = r_{КО} r_C \cos \angle BOC,$$

тогда

$$r_{КО} \cos \angle BOC = \frac{\vec{r}_{КО} \cdot \vec{r}_C}{r_C}. \quad (3)$$

С учётом (2) и (3)

$$BD^2 = r_{КО}^2 - \left(\frac{\vec{r}_{КО} \cdot \vec{r}_C}{r_C} \right)^2.$$

Таким образом, КО считается освещённым Солнцем при выполнении одного из условий $r_{КО}^2 - \left(\frac{\vec{r}_{КО} \cdot \vec{r}_C}{r_C} \right)^2 \geq R_3^2 \vee \vec{r}_{КО} \cdot \vec{r}_C > 0$.

Параметры движения освещённого Солнцем объекта могут быть определены, если не происходит засветка ФПУ Солнцем, Землёй и Луной. Проверка засветки осуществляется путём определения углового расстояния между КО и соответствующим небесным телом (рис. 5).

В связи с большой удалённостью Солнца и Луны с малой погрешностью справедливы равенства

$$\overline{AC} = \vec{r}_C,$$

$$\overline{AM} = \vec{r}_Л,$$

тогда

$$\angle BAC = \alpha_C,$$

$$\angle BAM = \alpha_Л.$$

С учётом того, что

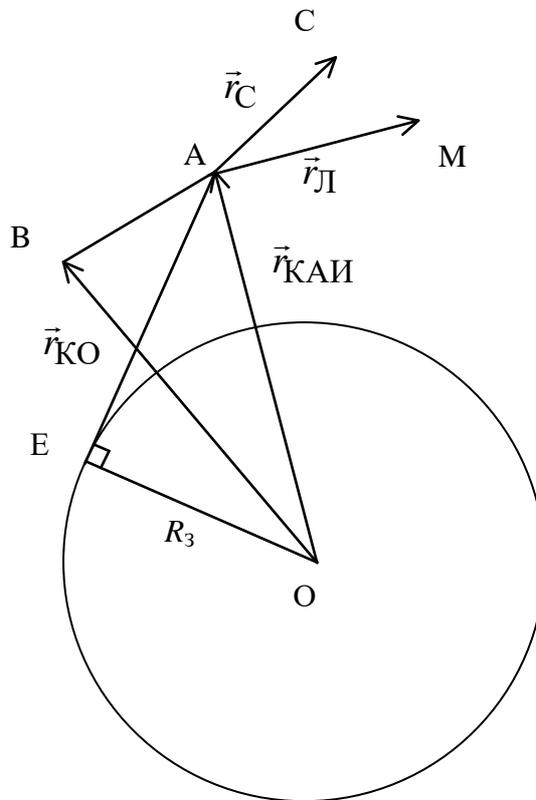


Рис. 5. К задаче определения засветки ФПУ: А – точка нахождения КАИ на орбите; В – КО; С – направление на Солнце; М – направление на Луну; О – центр Земли

$$\overline{AB} = \vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ},$$

$$\alpha_C = \arccos \frac{(\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}) \cdot \vec{r}_C}{|\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}| r_C}, \quad (3)$$

$$\alpha_Л = \arccos \frac{(\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}) \cdot \vec{r}_Л}{|\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}| r_Л}. \quad (4)$$

В ΔAOE

$$\angle EAO = \arcsin \frac{R_3}{r_{КАИ}},$$

тогда

$$\alpha_3 = \angle BAE = \angle BAO - \angle EAO = \arccos \frac{(\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}) \cdot (-\vec{r}_{КАИ})}{|\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}| r_{КАИ}} - \arcsin \frac{R_3}{r_{КАИ}} = \arccos \frac{(\vec{r}_{КАИ} - \vec{r}_{КО}) \cdot \vec{r}_{КАИ}}{|\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}| r_{КАИ}} - \arcsin \frac{R_3}{r_{КАИ}}. \quad (5)$$

С учётом (3) – (5) условия отсутствия засветки ФПУ со стороны Солнца, Земли и Луны записываются в виде системы неравенств

$$\begin{cases} \arccos \frac{(\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}) \cdot \vec{r}_С}{|\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}| r_С} \geq \alpha_{С \min}, \\ \arccos \frac{(\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}) \cdot \vec{r}_Л}{|\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}| r_Л} \geq \alpha_{Л \min}, \\ \arccos \frac{(\vec{r}_{КАИ} - \vec{r}_{КО}) \cdot \vec{r}_{КАИ}}{|\vec{r}_{КО} - \vec{r}_{КАИ}| r_{КАИ}} - \arcsin \frac{R_3}{r_{КАИ}} \geq \alpha_3 \min. \end{cases}$$

При отсутствии засветки наблюдение объекта полагается возможным, и формируется кортеж $c_j^k = \langle i_{1j}^k, i_{2j}^k, t_{вхj}^k, t_{выхj}^k \rangle$. Для каждого КО формируется множество $\omega_j = \{c_j^k, k = 1..K\}$, которое является элементом множества $\Omega = \{\omega_j, j = 1..J\}$.

Новизна представленной модели состоит в использовании динамического метода космической триангуляции.

Ниже приведены результаты моделирования функционирования ОСМКО, полученные на основе исходных данных, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение
Минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – Солнце, при котором не наступает засветка БОЭА, °	3
Минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – Луна, при котором не наступает засветка БОЭА, °	3

Окончание таблицы 1

Параметр	Значение
Минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – лимб Земли, при котором не наступает засветка БОЭА, °	3
Максимальная дальность обнаружения КО целевой аппаратурой КАИ, км	3000
Количество КАИ	16
Высота круговой орбиты, км	600
Наклонение плоскости орбит КАИ, °	99
Время начала моделирования	17.04.2017 00.00.00
Время окончания моделирования	17.04.2017 00.30.00
Количество низкоорбитальных объектов	110

Орбитальная группировка КАИ представлена 16 аппаратами, движущимися в двух плоскостях орбит, разнесённых по долготе восходящего узла на 45°, по 8 КАИ в каждой плоскости.

В качестве объектов мониторинга выбраны существующие КА дистанционного зондирования Земли и космической системы связи Iridium, параметры орбит которых взяты из каталога NORAD в виде TLE-элементов [7].

Полученные результаты после обработки могут быть представлены в графическом виде, упрощающем их интерпретацию (табл. 2, рис. 6, 7, 8).

Таблица 2

Таблица наблюдения КО

№ КО	Условный номер КАИ															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1																
2						2,3							3	1,2	1	
3						2,4	1						3,4	1,2,3		
4	1				3		2	1,2				3				
5	2,4,6	1						5,6	1,2,3							3,4,5

Строки табл. 2 соответствуют объектам мониторинга, а столбцы – КАИ. Номера, стоящие в ячейках таблицы, означают номера зон двойного обзора, через которые проходит объект. При повторном прохождении КО через зону двойного обзора, образованную одними и теми же КАИ, зона двойного обзора считается новой и получает следующий порядковый номер.

Временные интервалы наблюдения объектов представлены на рис. 6. На данном графике по оси абсцисс отложено время, по оси ординат – условный номер КАИ. Горизонтальные линии представляют собой интервалы нахождения каждого объекта в зоне двойного обзора, формируемой с участием соответствующего КАИ. При этом разные КО, наблюдаемые КАИ с номером i , разнесены по ординате в пределах интервала $[i - 1, i)$.

В связи с тем, что в пределах зоны видимости каждого КАИ может одновременно находиться большое количество объектов (рис. 6), возможна ситуация, когда ОСМКО будет неспособна определить параметры движения всех КО, находящихся в данный момент в некоторых зонах двойного обзора. Задача определения параметров их движения должна быть решена при следующих их прохождении через зоны двойного обзора. Для определения возможности решения указанной задачи введён такой частный показатель качества функционирования ОСМКО, как вариативность наблюдения каждого объекта (рис. 7), равная количеству прохождений объектом зон двойного обзора за время моделирования.

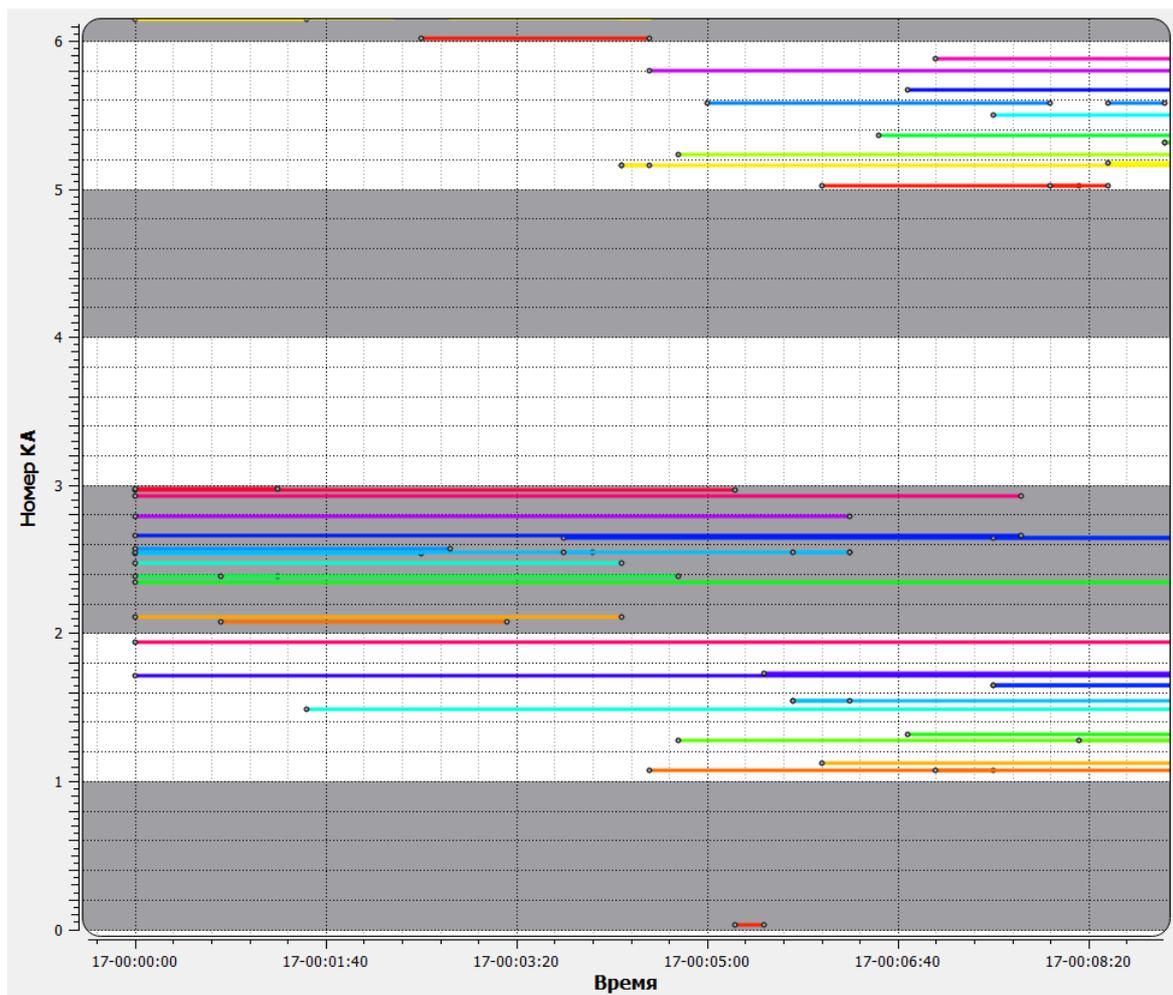


Рис. 6. Временные интервалы наблюдения КО

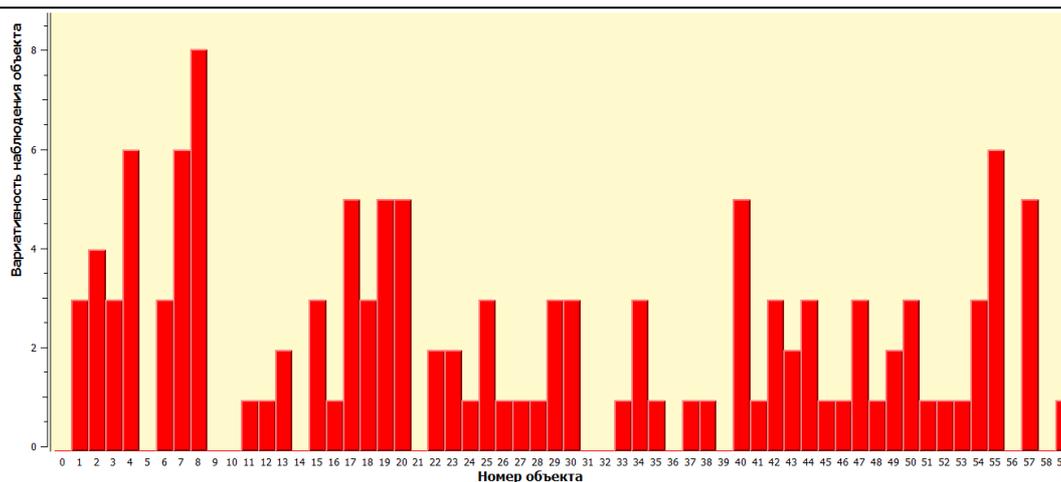


Рис. 7. Вариативность наблюдения объектов

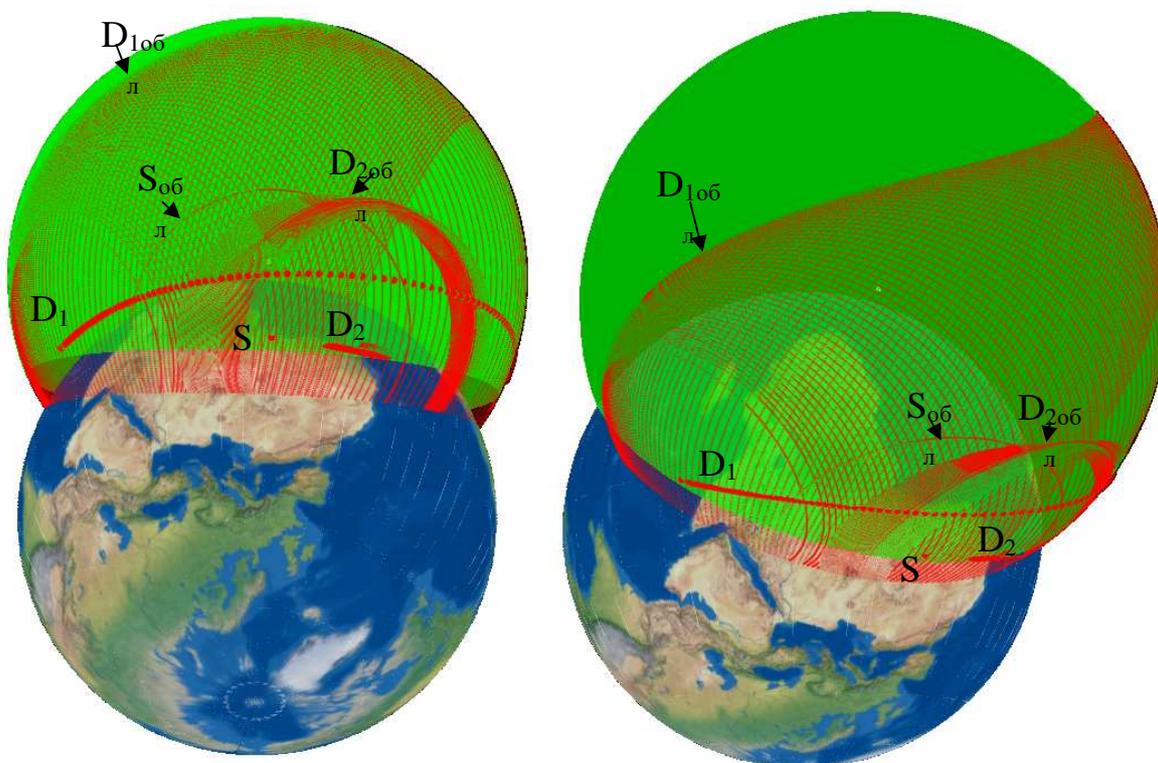


Рис. 8. Визуализация результатов моделирования

На рис. 8 точка S соответствует пересечению линии визирования соседних КАИ, движущихся в одной орбитальной плоскости, с введённой ранее координатной сферой. При этом обнаружение КО осуществляется в пределах телесного угла, задаваемого окружностью $S_{обл}$, радиус которой определяется из уравнения (1).

Кривые D_1 и D_2 соответствуют ориентации линии визирования между рассматриваемым КАИ и КАИ, движущимися в других орбитальных плоскостях. Соответствующие области пространства, в пределах ко-

торых может происходить определение параметров движения КО, ограничиваются огибающей ($D_{1обл}$ и $D_{2обл}$ на рис. 8) множества окружностей с центрами в каждой точке представленных кривых и радиусами, определяемыми в соответствии с уравнением (1).

При моделировании функционирования ОСМКО необходимо учитывать возможность засветки БОЭА Солнцем, Луной и Землёй, поэтому преимущество выбранной СК заключается в простоте учёта засветки БОЭА Землёй в виде отсечения сферического сегмента, соответствующего значениям широт (рис. 9)

$$\varphi_3 \leq \alpha_3 + \arcsin \frac{R_3}{r} - \frac{\pi}{2},$$

где α_3 – минимальное значение угла между направлением на лимб Земли и КО, при котором не наступает засветка БОЭА; R_3 – радиус Земли; r – расстояние от КАИ до центра Земли.

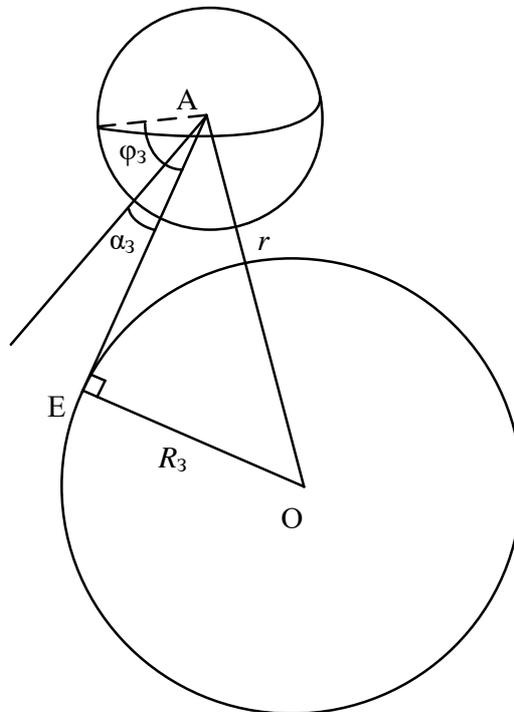


Рис. 9. К задаче определения величины φ_3

Новизна модели заключается в её адаптации для определения пространственно-временных параметров функционирования ОСМКО с использованием динамического метода космической триангуляции.

Заключение

Получаемые в результате применения разработанной модели временные параметры могут быть использованы для оценивания эффективности функционирования ОСМКО, в частности для определения предельного значения показателя результативности (относительного количества наблю-

даемых КО), оперативности (времени, за которое достигается требуемое значение показателя результативности) и функции вариативности, характеризующей относительное количество КО, наблюдаемых с вариативностью, не хуже заданной.

Пространственные параметры функционирования ОСМКО могут быть использованы при обосновании конструктивного облика КА для определения мест установки БОЭА и компоновки других элементов конструкции, способных оказать влияние на работу оптических приборов, например панелей солнечных батарей, которые могут ограничивать угол обзора аппаратуры наблюдения. При этом задача обоснования конструктивного облика КАИ может ставиться как задача о покрытии областей S , $D_{1\text{обл}}$, $D_{2\text{обл}}$ и т.д. минимальным количеством БОЭП с учётом характеристик последних.

Дальнейшим направлением совершенствования модели является её адаптация к некоторым частным случаям, соответствующим определённым классам орбит, на множестве которых происходит обоснование рациональной баллистической структуры ОСМКО, например множестве равновеликих круговых орбит.

Список литературы

1. Orbital Debris Quarterly News. NASA, Vol. 21, I. 1, Feb. 2017. P. 12.
2. СККП России: вчера, сегодня, завтра. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: www.army.lv/ru/SKKP-Rossii-vchera-segonya-zavtra./2615/2489 (дата обращения 01.02.2018).
3. United States Space Surveillance Network. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Space_Surveillance_Network (дата обращения: 01.02.2018).
4. Половников В.И., Скутницкий В.М. Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции. СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2012. 175 с.
5. Половников, В.И., Лобков, И.А. Орбитальная система контроля космического пространства. Современные проблемы механики и её преподавание в вузе: труды Всероссийской научно-методической конференции. В 2 т. Т.2 / ред. кол.: Ю.В. Кулешов, Л.К. Горшков, В.В. Козлов и др. СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2015. С. 163–167.
6. Койнаш Б.М. Определение положений космических объектов при наблюдениях с подвижного измерителя на фоне звездного неба: общ. № 129. ИПА РАН. 1999. 38 с.
7. NORAD Two-Line Element Sets Current Data. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.celestrak.com> (дата обращения: 01.04.2017).

Фадин Илья Алексеевич, канд. техн. наук, начальник лаборатории – старший научный сотрудник, 4ilyal@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Янов Сергей Владимирович, канд. воен. наук, начальник лаборатории – старший научный сотрудник, 6371km@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

TIME OPERATION MODEL OF SPACE AWARENESS ORBITAL SYSTEM

I.A. Fadin, S.V. Yanov

The model allows to determine space objects observation parameters with space objects, measuring space craft, Moon and Sun movement parameters initial data.

Key words: space awareness, model, optimization, space triangulation dynamic method.

Fadin Ilya Alekseyevich, candidate of technical science, 4ilyal@gmail.com, Russia, Sankt-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Yanov Sergey Vladimirovich, candidate of military science, 6371km@mail.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ГЛУБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКОЙ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В.А. Селихов

В данной статье осуществляется формирование информации о глубине или пространстве на основе монокулярных изображений бортовых камер БПЛА (один кадр – одно изображение). Некоторые методы использовались для логически схожих пространственных задач с различной степенью успеха, однако, в данном исследовании используется иной подход: формирование граничной окантовки как задача стилевого переноса. В данной статье осуществляется адаптивное обучение двух современных методик переноса стиля для решения задач вычисления глубины. Первая методика была адаптирована с помощью подхода Pix2Pix, использующего обучение без учителя. Вторая – посредством применения циклической генеративно-сопоставительной сети (cyclic generative adversarial network – cycle GAN). В дополнение к этим двум подходам также был реализован базовый алгоритм, который использовался для получения карты глубины в закрытых помещениях (масштабируемая глубокая сеть). На основе данных идей была разработана новая усовершенствованная методология построения карты глубины. Эти нейронные сети были обучены на визуальных образах изображений БПЛА и парных картах глубин, созданных с помощью высокоточной среды имитации БПЛА и окружающей среды Microsoft AirSim. Производительность каждой сети тестировалась с помощью специального набора входных данных в конце процесса обучения, а эффективность была оценена тремя показателями. Хотя исследуемая сеть не смогла превзойти другие подходы, кроме cycle GANs, предполагается, что данный подход может показывать существенные результаты после модификации в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: БПЛА, карта глубин, искусственные нейронные сети, ИНС, сверточная нейронная сеть, СНС, Microsoft AirSim, Pix2Pix, CycleGAN, функция потерь, обучение нейронных сетей, масштабируемая глубокая сеть, машинное обучение, глубокое обучение.

Последние достижения в области БПЛА технологий привели к распространению транспортных средств среди людей, использующих БПЛА как хобби и в высокодоходных коммерческих целях. Несмотря на то, что эти машины способны фиксировать изображения с относительно недорогих бортовых камер, высокая стоимость специализированных датчиков ограничивает спектр задач, которые способны решать БПЛА. Извлечение и обработка информации из визуальных изображений обеспечивают эффективное решение некоторых задач с использованием камер относительно недорогой стоимости. В данной статье исследуется одна из задач такого рода, как определение (вычисление) расстояния или глубины, обеспечивающее надежное отображение 3D-сцены по разумной цене. Сформированная информация может использоваться для решения различных задач, таких как:

- метод одновременной локализации и построения карты (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM);

- преодоление препятствий;
- создание 3D-карт.

Предыдущие исследования.

В предыдущих исследованиях использовался целый спектр подходов. В некоторых успешных исследованиях использовалась информация о стереоизображениях [1, 2]. Исследовались техники в некоторой степени схожие на технику данной статьи. В исследованиях использовались масштабируемые сети Маркова (Марковское случайное поле) для моделирования отношений между объектами и глубиной [3]. В некоторых методиках использовалась классификация изображений, осуществляющая формирование карты глубины [4]. Сегментация использовалась для генерации некоторых данных, используемых в создании карты глубины [5] или сокрытии точек/линий [6]. Недавние исследования описывали использование глубоких сверточных нейронных сетей для осуществления оценки глубины [7, 8]. Хотя подход, использующий масштабирующую глубокую сеть, как известно, был успешным, обучающаяся выборка, представляющая из себя внутренние изображения, существенно отличается от обучающихся выборок данного исследования. Было обнаружено, что тот подход показывает невысокую точность и производительность на обучающей выборке данного исследования, скорее всего это связано с неупорядоченностью геометрии наружных сцен. В другом подходе используются остаточные сети для анализа функции сопоставления с выборкой исходной сцены вместе с обратной потерей Хубера, результаты показали, что для хорошей производительности требуется небольшое количество обучающих выборок [9]. В данном исследовании используется стилевая передача как картографическое решение, основанное на предыдущих исследованиях, в частности в области адаптации [10, 11]. Вывод конечного результата для нового подхода, описываемого в данной статье, был получен, основываясь на передаче ключевых характеристик [12]. Методика, использующая обучение без учителя, и основанная на принципе потерь признаков была описана в [13]. Т.к. в данной методике отсутствует человеческий контроль, то она уязвима проблеме снижения точности. Нейросетевые технологии также использовались для оценок, основанных на нескольких изображениях, в частности изображений стереокамер [14, 15]. Несмотря на то, что данные подходы являются эффективными и полезными, что можно увидеть в сравнение изображений, они все равно требуют более дорогой аппаратуры.

Техническое решение.

Данное исследование было начато с аналитики точности и производительности существующих подходов, использующих перенос стиля для создания карты глубины, а затем была осуществлена модификация данных подходов для увеличения их эффективности. Кроме того, было осуществлено внедрение в качестве основного алгоритма существующего метода, использующего глубокое обучение и свёрточные нейронные сети, для генерации карты глубин. В конечном счете, был разработан новый подход, основанный на переносе признаков. В общей сложности, было реализовано

четыре метода, способных формировать карту глубины с разной точностью и производительностью: Pix2Pix, Cycle GAN, масштабируемая глубокая сеть и новый стилевой передатчик, основанный на свёрточной нейронной сети.

Обучающие выборки. Все сети были обучены с помощью данных, сгенерированных Microsoft AirSim. Сложная среда симуляции окружения БПЛА была специально разработана для формирования изображений, используемых для глубокого обучения [16]. Microsoft AirSim – это оборудование, моделирующее циклический симулятор, формирующий необработанные изображения и карты глубин имитированных фотореалистичных сред. Окружение использовалось для сбора обучающих данных. Пример настройки эмулятора и сформированные изображения показаны на рис. 1-3. Симулятор сгенерировал 1963 пары изображений. Изображения формировались случайным образом для уменьшения временного сходства, и были разделены на три категории: обучающие данные, данные проверки, и данные, предназначенные для тестирования. 70% – обучающие данные, 20% – проверочные, 10% – для тестирования.



Рис. 1. Пример использования AirSim



Рис. 2. Пример использования AirSim



Рис. 3. Пример использования AirSim

Pix2Pix. Восходящий подход в преобразовании типа «изображение-изображение» реализуется посредством генеративных аддитивных сетей (Generative Additive Networks – GANs), стремящихся сформировать реалистичный выход. Pix2Pix – это условная GAN-сеть, не являющаяся конкретным приложением. Сеть является условной, потому что, вместо обучения отображения случайного вектора шума Z на выходное изображение Y , она обучает отображению входного изображения X и случайного вектора шума Z на выходное изображение Y . Добавленное входное значение позволяет успешно осуществлять преобразование типа «изображение-изображение» [10]. Данная сеть обучается функцией потерь:

$$\underset{G}{\operatorname{argmin}} \max_D L_{cGAN}(G, D) + \lambda_{L1}(G) \quad (1)$$

где G – это генератор; D – дискриминатор; L_{cGAN} -

$$L_{cGAN} = E_{x,y:Pdata(x,y)}[\log D(x,y)] + E_{x,y:Pdata(x),z:P_z(z)}[\log(1 - D(x, G(x,z)))] \quad (2)$$

и λ_{L1} – гиперпараметр.

CycleGAN. Расширение Pix2Pix является сетью CycleGAN, которая обучается не только сопоставлению входного изображения X выходному Y , но также восстановлению входного изображения X по выходному Y . CycleGAN принимает на вход два набора изображений с различными характеристиками и не требует наличия парных изображений. Если обучающие данные не представлены в парах, то существует неопределенность целевой функции, которая выступает посредником в задачи циклической трансляции. Например, если взять предыдущие входы и выходы (X и Y), то в целевой функции будет потеряна согласованность циклов, основанная на результатах преобразования $X \rightarrow Y \rightarrow X$. Поэтому данная сеть обучается функцией потерь:

$$L_{GAN}(G, D_Y, X, Y) + L_{GAN}(F, D_X, Y, X) + \lambda L_{cyc}(G, F), \quad (3)$$

где $L_{GAN}(G, D_Y, X, Y)$ вычисляется по следующей формуле:

$$L_{GAN}(G, D_Y, X, Y) = E_{y:Pdata(y)}[\log D_Y(Y)] + E_{x:Pdata(x)}[\log(1 - D_Y(G(x)))] \quad (4)$$

$L_{GAN}(F, D_X, Y, X)$ вычисляется по формуле:

$$L_{GAN}(F, D_X, Y, X) = E_{x:Pdata(x)}[\log D_Y(Y)] + \quad (6)$$

$$+ E_{y:Pdata(y)}[\log(1 - D_Y(F(y))];$$

λ — гиперпараметр; $L_{cyc}(G, F)$ вычисляется по формуле:

$$L_{cyc}(G, F) = E_{x:Pdata(x)}[\|F(G(x)) - x\|_1] + \quad (7)$$

$$+ E_{y:Pdata(y)}[\|G(F(y)) - y\|_1]$$

Репозиторий, описывающий обе сети приведен в работе [18].

Масштабируемая глубокая сеть. Масштабируемая глубокая нейронная сеть состоит из сверточных слоев и полносвязных слоев, позволяющих получать как приближенную карту глубин, так и точную [8]. Архитектура нейронной сети состоит из двух отдельных ветвей. Первой ветви на вход подается исходное изображение, далее оно проходит через ряд сверточных слоев и 2x2 слоев объединения. После пяти сверточных слоев, данные изображений сглаживаются и подаются на вход двум полносвязным слоям. Выходные данные этой ветви преобразуются в изображение размером примерно в четверть высоты и ширины от исходного изображения. В данной сети используется объединение с максимальной степенью и небольшой пространственный размер, необходимые для создания более глобальной аппроксимации карты глубины в период обучения нейронной сети.

Вторая ветвь сети принимает на вход оригинал изображения сцены и применяет к нему 63 9x9 сверточных фильтров, а на втором шаге обрабатываемые данные проходят через 2x2 слоя максимального заполнения. Выходное значение слоя имеет ту же пространственную размерность, что и выходное значение первого слоя. К выходному значению первого слоя применяется операция конкатенации для получения глубины с тензором размером 64. Вторая ветвь содержит еще два 5x5 сверточных слоя перед получением окончательного изображения глубин. Данный подход объединяет приближенную карту глубин с объектами исходного изображения, позволяя сети создавать более детальные карты глубин в конце второй ветви.

Функция потерь для этой сети основана на разности значений логарифма, которая делает потерю инвариантом к масштабу глубины [17]. Учитывая настоящее значение глубины y_i , и приближенное \hat{y}_i , для $i \in \{1, \dots, n\}$, где n — количество пикселей, функция потерь определяется следующими формулами:

$$d_i = \log(y_i) - \log(\hat{y}_i) \quad (8)$$

$$L(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 - \frac{\lambda}{n^2} \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2 \quad (9)$$

Использование логарифмов может привести к отсутствию устойчивости, если входное значение равно нулю, а в исследуемом наборе пикселей есть нулевые значения. Для решения данной проблемы к значениям глубины прибавляется некоторое фиксированное значение перед вычислением их логарифма и значения функции потерь. Кроме того, в данной модели используется другая функция потерь, основанную на $d_i = y_i - \hat{y}_i$, необходимую для исследования зависимости наличия логарифма на производительность, вне зависимости является ли потеря инвариантом по шкале. Кроме того, обучающая выборка имеет относительно маленький размер для обучения с учителем, поэтому были добавлены фильтры для приближенного результата полносвязного слоя для минимизации учащенной операции подгонки.

Стилевая передача на основе CNN. В дополнении к вышеописанным подходам также был разработан новый подход отображения глубины. Данная методика основана на передаче стилей с использованием CNN [12]. Главной особенностью подхода является то, что сеть обучается не на основе потерь «пиксель-на-пиксель», т.к. это в большинстве случаев приводит к чрезмерно размытым образам, но сеть должна быть настроена таким образом, чтобы сохранялись перцептивные особенности изображений. Для того чтобы определить эти особенности, автокодируемая сеть вначале была обучена на картах глубин, таким образом, чтобы представления уменьшались до минимального размера на среднем слое. Данные минимальные характеристики берутся для представления наиболее важных характеристик, которые необходимо сохранять. Очевидно, что данные характеристики содержат всю информацию, необходимую для формирования карт глубин. Автокодируемая сеть использует прогрессивные сверточные слои для уменьшения двухмерного размера изображения при увеличении глубины фильтра. После слоев кодирования дешифратор увеличивает размер изображения транспонированием свертки. Изначально дешифраторы увеличивают размер промежуточного изображения до размера исходного изображения. Однако данные действия приводят к значительному эффекту «клетчатости» в конечном изображении. Проблема была решена путем преобразования изображения в два двумерных образа оригинального изображения с последующей операцией прогрессивной свертки, заканчивающей генерацию конечного изображения. Т.к. выходное изображение получается в оттенках серого, на выходе находится только один канал трижды продублированный для возможности обратного преобразования в RGB изображение.

Автоматический кодировщик изначально обучался только на функции потери L2 относительно исходного изображения карты глубины. Также он может эффективно восстанавливать изображение с меньшими потерями после обучения такого рода, анализом общей производительности было установлено, что сеть передачи не является высокопроизводительной

и точной. Было выявлено, что передаточная сеть не может восстанавливать те же особенности из RGB изображений, как из карт глубин. Затем автоматический кодировщик был переобучен с использованием более сложной функции потерь.

$$L_T = L_{L2} + \lambda_{\alpha} L_{features}, \quad (10)$$

где L_{L2} – потеря L2; λ_{α} – гиперпараметр; $L_{features}$ определяется формулой:

$$L_{features} = L2(f(X) - f(Y)), \quad (11)$$

где $f(X)$ и $f(Y)$ – признаки, закодированные из визуального изображения и карты глубины соответственно. Это значительно способствует увеличению производительности сети передачи, хотя дополнительное увеличение производительности может быть обеспечено модификацией архитектуры сети и перенастройкой параметров обучения. Как только автоматический шифратор будет обучен, вторая сеть с идентичной шифратору архитектурой будет настроена в качестве сети передачи. Слои дешифратора передаточной сети инициализируются весовой матрицей автошифратора. Сеть передачи обучается с помощью визуальных изображений, выходными значениями являются карты глубин.

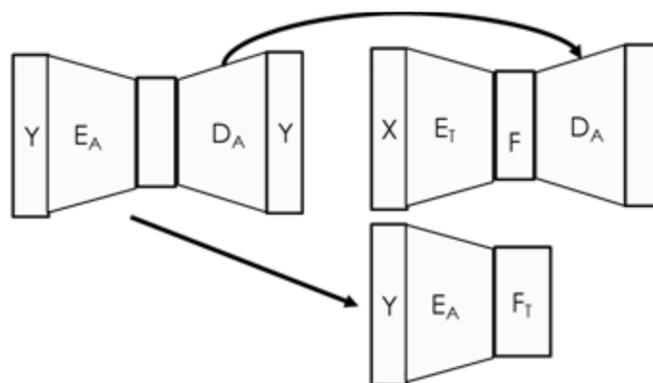


Рис. 4. Архитектура сети передачи стилей, основанной на CNN.

Функция потерь является составной функцией потерь:

$$L_i = L_{L2} + \lambda * L_f; \quad (12)$$

где L_{L2} определяется формулой:

$$L_{L2} = L2(Y_e - Y); \quad (13)$$

Y_e определяется по формуле:

$$Y_e = L2(features_e(X) - features(Y)), \quad (14)$$

λ – гиперпараметр.

Эксперимент

После того как каждая сеть прошла обучение, тестовое множество входных значений подается на каждую сеть и оценивается выходное значение со средним значением абсолютной ошибки (АО), среднеквадратичной ошибки (СКО) и среднеквадратичной логарифмической ошибки (СКЛО). Величина АО влияет на среднюю ошибку пикселей, в то время как СКО оказывает большее влияние на значительные ошибки передачи стилей. Метрика СКЛО является инвариантной в отношении масштаба и эквивалентной логарифму отношения. СКЛО зависит от отличия истинного значения глубины и предсказанного. Данная метрика должна зависеть от близлежащих объектов, т.к. корректировка глубины ближних слоев является более важной, чем корректировка дальних слоев. Все ошибки представляют собой средние значения настоящей и сгенерированной сетью глубины (d_{real} и $d_{network}$). Пусть n – общее количество пикселей тестируемого множества, $d_{real}^{(i)}$ и $d_{network}^{(i)}$ – настоящее значение глубины и сгенерированное системой для i -го пикселя. АО вычисляется следующим образом:

$$АО = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| d_{real}^{(i)} - d_{network}^{(i)} \right| \quad (15)$$

СКО определяется следующим образом:

$$СКО = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(d_{real}^{(i)} - d_{network}^{(i)} \right)^2} \quad (16)$$

СКЛО:

$$СКЛО = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\log(256 - d_{real}^{(i)}) - \log(256 - d_{network}^{(i)}) \right)^2} \quad (17)$$

Результаты тестирования каждой категории сети представлены в табл. 1-2.

Таблица 1

Результаты тестирования каждой сети

Сеть	АО	СКО	СКЛО
Pix2Pix	15.7	676.5	0.357
CycleGAN	22.6	1165.7	0.348
Масштабируемая глубокая сеть	15.9	659.9	0.399
Сеть передачи стилей	22.4	1080.5	0.434

Таблица 2

Результаты тестирования CycleGAN сети с корректировкой весов

$X \rightarrow Y \rightarrow X$	$Y \rightarrow X \rightarrow Y$	АО	СКО	СКЛО
Весы А	Весы В			
1	1	37.6	2219.6	0.484
5	5	23.7	1310.4	0.489
10	10	22.6	1165.7	0.348
20	20	23.9	1315.7	0.450
5	10	24.4	1367.5	0.450
1	5	28.1	1660.6	0.479

Результаты

Тестируемые изображения были выбраны потому что, они содержат много городских объектов: дороги, инфраструктура, деревья прочая растительность.

Pix2Pix был запущен без изменений исходной конфигурации [10], и показал хорошие результаты. Данная сеть показала минимальные АО и близкие к минимальным значения СКЛО.

CycleGAN был запущен без изменений исходной конфигурации [11] и показал меньшее значение СКЛО, однако ожидалось, что он сможет улучшить СКО и АО. Было выдвинуто предположение, что слишком большие весовые матрицы могут привести к неверному обучению сети, поэтому была осуществлена корректировка весов. Предположение по улучшению производительности не оправдалось.

Для масштабируемой глубокой сети функция потерь была исследована проблема отсутствия устойчивости. В ранних подходах потеря была основана на разности между логарифмами значений пикселей, но анализ показывает, что обученные данным образом сети имеют невысокую точность и эффективность. Одной из причин является то, что используемый набор данных нормализуется, и в отдаленных местах появляются нулевые значения и это приводит к существенным потерям. Результаты проверки показали, что сеть генерирует приближенные и затемненные карты глубин, а недостаточно точные оценки карт.

Когда функция потерь использует разницу между значениями пикселей, производительность существенно улучшается (табл. 3). В результате данная модификация функции потерь использовалась в масштабируемой глубокой сети.

Таблица 3

Результаты тестирования каждой сети

Тип функции потерь	АО	СКО	СКЛО
Логарифмическая разность	42.2	3246.7	0.632
Разность	15.9	659.9	0.399

Одной из проблем использования масштабируемой глубокой сети является небольшой размер набора данных. На рис. 5 показано что, потери обучающего набора намного меньше, чем проверочного набора (однако присутствует логарифмическое масштабирование по оси y). Для уменьшения влияния переобучения после сверточных слоев была добавлена фильтрация с вероятностью сохранения активации 0.5. Зеленые и черные линии на рис. 5 показывают влияние фильтрации на потери. Потери на этапе обучения больше, чем потери на этапе проверки. Для решения данной проблемы требуется большой набор данных. AirSim является современным и мощным инструментом, формирующим наборы данных, необходимые для обучения систем восприятия и анализа изображений БПЛА, осуществляющих обучение без учителя.

CNN, осуществляющая передачу стилей была обучена с помощью алгоритма Адама для оптимизации. Начальная скорость оптимизации была установлена в 10⁻³, на этапе обучения конфигурационные параметры были установлены в значения по умолчанию. На более поздних этапах, когда потери стали увеличиваться, скорость обучения была увеличена. Этапы, на которые был разделен процесс обучения, ограничивались пятью изображениями. Это было обусловлено ограничением выделения памяти GPU, на котором происходил процесс обучения. Основными гиперпараметрами, исследованными в данной работе, были условия формирования матрицы весов. Значение функции потерь было на порядок выше, чем L2 потери в начале обучения, поэтому относительное соотношение потерь на обоих этапах является почти эквивалентным. Настройка конфигурации осуществлялась до добавления составной функции потерь в обучающий модуль автоматического кодировщика. Условия формирования матрицы весов также выбирались через гиперпараметры. Значение условия было установлено равным 0.1 для конечного обучения. Автоматический кодировщик был обучен на 50 эпохах, а сеть передачи более чем на 100 эпохах. Конечная производительность исследуемой сети не превзошла производительность основной сети по каждой из метрик. Скорее всего, это связано с соответствующим представлением центрального слоя автоматического кодировщика, не осуществляющего извлечение как из RGB изображения, так и из карты глубины. Однако точность и качество CNN сети переноса стилей превосходят и Pix2Pix, и основной алгоритм. Кроме того, в CycleGAN формы объектов являются более определенными, но сами точки могут быть весьма нечеткими. Предполагается, что новый метод может как сохранять особенности представления объектов, так и точно отображать средние значения на карте. В дальнейшем производительность архитектуры может быть увеличена. Сгенерированные сетями карты глубин представлены рис. 5-16.



Рис. 5. Оригинальная карта глубины



Рис. 6. Pix2Pix



Рис. 7. CycleGAN.



Рис. 8. Масштабируемая глубокая сеть.

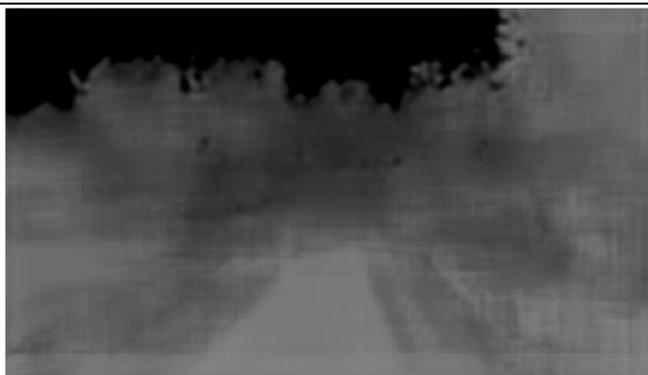


Рис. 9. Сеть переноса стилей CNN.

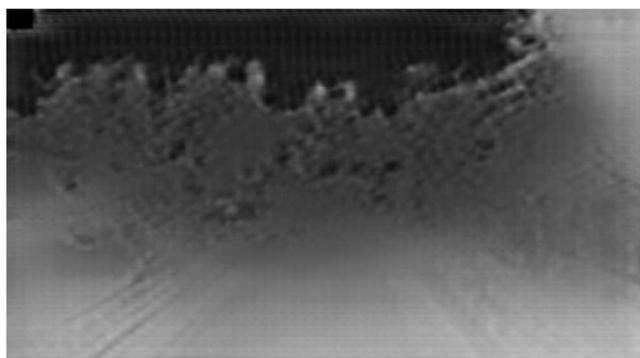


Рис. 10. Сгенерированные сетями карты глубин при $A = 1$, $B = 1$.



Рис. 11. Сгенерированные сетями карты глубин при $A = 5$, $B = 5$.



Рис. 12. Сгенерированные сетями карты глубин при $A = 10$, $B = 10$.



Рис. 13. Сгенерированные сетями карты глубин при $A = 20, B = 20$.



Рис. 14. Сгенерированные сетями карты глубин при $A = 5, B = 10$.

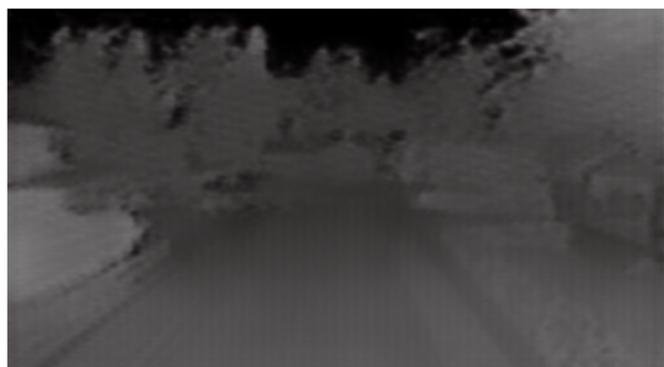


Рис. 15. Сгенерированные сетями карты глубин при $A = 1, B = 5$.



Рис. 16. Сгенерированные сетями карты глубин при $A = 5, B = 1$.

Заключение

Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод, что основной алгоритм и масштабируемая глубокая сеть превзошли все методы в производительности по каждой из метрик. Анализ выходных карт показал, что сформированные изображения являются достаточно расплывчатыми. Но т.к. методики смогли уменьшить средние значения ошибок, они являются перспективными для дальнейших исследований. Методика, основанная на CycleGAN, способна четко сохранять особенности изображений, однако средние значения ошибок часто достигают высоких значений. Они были уменьшены внедрением комплексной и адаптированной функции потерь в этап обучения. Дальнейшая модификация системы может обеспечить увеличение производительности.

Список литературы

1. Heo Y. S., Lee K. M., and Lee S. U. Joint depth map and color consistency estimation for stereo images with different illuminations and cameras. *IEEE // Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013. 35.
2. Block-based vanishing line and vanishing point detection for 3d scene reconstruction. In 2006 / Y. M. Tsai, Y. L. Chang, L. G. Chen // *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications*. 2006.
3. Ashutosh Saxena, Sung H Chung, and Andrew Y Ng. 3-d depth reconstruction from a single still image. // *International journal of computer vision*. 2008. (1).
4. Battiato Sebastiano, Curti Salvatore, La Cascia Marco, Tortora Marcello, Scordato Emiliano. Depth map generation by image classification. // *Proc. SPIE 5302, Three-Dimensional Image Capture and Applications VI*. 2004.
5. Depth map generation for 2d-to-3d conversion by short-term motion assisted color segmentation. / Y. L. Chang, C. Y. Fang, L. F. Ding, S. E. Chen, L. G. Chen // *International Conference on Signal Processing Proceedings, ICSP*. 2007.
6. 3d stereoscopic image pairs by depth-map generation. In *Proceedings of the 3D Data Processing, Visualization, and Transmission / S. Battiato, A. Capra, S Curti, M La Cascia // 2Nd International Symposium*. 2004.
7. Deep convolutional neural fields for depth estimation from a single image / F. Liu, C. Shen, G. Lin // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015.
8. Eigen D., Puhrsch C., Fergus R. Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network. // *Advances in neural information processing systems*. 2014.
9. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks. / I. Laina, C. Rupprecht, V. Belagiannis, F. Tombari, N. Navab // *3D Vision (3DV) Fourth International Conference on. IEEE*. 2016. P. 239–248.

10. Isola P, Zhu J-Y, Zhou Tinghui, Efros A. A. Image-to-image translation with conditional adversarial networks. // CoRR. 2016.
11. Zhu J-Y, Park T., Isola P., Efros. A. A. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. // arXiv preprint arXiv:1703.10593. 2017.
12. Johnson J., Alahi A., and Li F-F. Perceptual losses for real-time style transfer and super-resolution. // CoRR. 2016.
13. Garg R., Vijay Kumar B. G., Reid I. D. Unsupervised CNN for single view depth estimation: Geometry to the rescue. // CoRR. 2016.
14. Zbontar J., LeCun Y. Stereo matching by training a convolutional neural network to compare image patches. // CoRR. 2015.
15. Efficient deep learning for stereo matching. / W. Luo, A. G. Schwing, R. Urtasun // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). June 2016.
16. Shah S., Dey D., Lovett C., Kapoor A. // Airsim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles. 2017.
17. Eigen D., Puhrsch C., Fergus R. Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network. // Advances in Neural Information Processing Systems 2014. 27.
18. CycleGAN and pix2pix in PyTorch [Электронный ресурс] URL: <https://github.com/junyanz/pytorch-CycleGAN-and-pix2pix>. (дата обращения: 10.06.2018)

Селихов Владимир Александрович, инженер, selikhovvladimir@gmail.com, Россия, Москва, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

THE DEPTH MAP GENERATION BASED ON THE DEEP CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

V.A. Selikhov

In this article, information is being generated on the depth or space based on monocular images of UAV airborne cameras (one frame is one image). Some methods were used for logically similar spatial problems with varying degrees of success, however, this study uses a different approach: the formation of boundary edging as a problem of style transfer. This article is an adaptation of two modern methods of transfer of style for the decision of tasks of calculation of depth. The first technique was adapted using the Pix2Pix approach, which uses teacher-less learning. The second – through the use of cyclic generative-adversarial network (cyclic generic adversarial network – cycle GAN). In addition to these two approaches, a basic algorithm was also implemented, which was used to obtain a depth map in covered areas (scalable deep network). On the basis of these ideas, a new improved methodology for building a depth map was developed. These neural networks were trained on the visual images of the images of the UAV and the paired maps of the deep, created using high-precision environment of the simulated UAVs and environment Microsoft AirSim. The performance of each network was tested using a specific set of inputs at the end of the training process, and the performance was evaluated by three indicators. Although the network studied was not able to surpass other approaches than cycle GANs, it is assumed that this approach can show significant results after modification in further research.

Key words: UAV, depth map, artificial neural networks, ANN, convoluted neural network, SNA, Microsoft AirSim, Pix2Pix, CycleGAN, loss function, neural network training, Multi-Scale Deep Network, machine learning, deep learning.

Selikhov Vladimir Alexandrovich, engineer, selikhovladimir@gmail.com, Russia, Moscow, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

УДК 004.052.34

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АЛГОРИТМА ВЕРИФИКАЦИИ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДОСТУПА

С.В. Бибиков, А.Г. Певнева, Э.М. Халиков

Предложена методика оценки качественных показателей алгоритма функционирования биометрической системы верификации диктора с целью оценки функциональной безопасности системы доступа. Методика разработана на основании положений теории помехоустойчивости радиотехнических систем.

Ключевые слова: биометрическая система доступа, верификация диктора, оценка ошибки доступа, функциональная безопасность.

Информационные системы, предназначенные для структурированного хранения информации, с целью удобного доступа и представления, не несут в себе непосредственной угрозы жизни и здоровью людей. Опасность возникает при реализации алгоритмов принятия решений в системе искусственного интеллекта (СИИ). СИИ решает задачу распознавания объекта в какой-либо постановке – задачу идентификации, задачу верификации и т.д. Очевидно, что ошибочный вывод в итоге процесса распознавания повлечет за собой принятие ошибочного решения, последствия которого могут быть непредсказуемы.

В общем, такие системы можно считать системами управления и контроля. К этим системам понятие функциональной безопасности имеет прямое отношение [1]. Контроль или мониторинг может рассматриваться как сбор данных с выдачей управляющего воздействия только в случае обнаружения критического состояния, следовательно, считается частным случаем системы управления. Критическим состоянием здесь считается обнаружение нераспознанных контуров в видеопотоке в системе наблюдения, или наличие нераспознанных компонент в смеси речевых сигналов.

Информационная и функциональная безопасность, по сути, есть две стороны одного и того же явления. Свойство информационной безопасности обеспечивает доступность, целостность и конфиденциальность данных системы управления. В [2] проведен анализ киберугроз и методов обеспечения информационной безопасности для интернета вещей (Internet of Things, IoT). В соответствии с комплексом стандартов ГОСТ Р МЭК 61508[3] свойство функциональной безопасности должно обеспечить корректное выполнение системой своих функций, а при возникновении критических ситуаций перевести объект управления в одно из безопасных состояний.

При оценке функциональной безопасности степень полноты безопасности системы оценивают как степень риска невыполнения системой своей основной функции, причем этот риск несет угрозу жизни, здоровья или благосостояния человека. Часто основным показателем функциональной безопасности электронной системы считается надежность, мерой которой считают время наработки на отказ. Восстанавливаемый сбой системы или кратковременное невыполнение своей функции трудно оценить и учесть. Тем не менее, учет качественных показателей алгоритма реализации основной функции в программно-аппаратной электронной системе необходим для оценки функциональной безопасности. На начальном этапе проектирования системы доступа или в процессе разработки или модернизации программных средств необходима достоверная и не особо трудоемкая оценка качественных показателей алгоритма основной функции системы. Наиболее информативным показателем для системы доступа представляется оценка риска принятия ошибочного решения.

Для решения этой задачи применим хорошо разработанный аппарат проверки статистических гипотез. В общем случае, эта оценка сводится к варьированию уровней значимости статистической гипотезы в зависимости от меры и структуры множества, на котором определены соответствующие случайные события, то есть, в конечном счете, от распределения вероятностей.

Выбор речевых технологий в качестве предмета исследования обусловлен, с одной стороны, более скромными требованиями к объему данных, по сравнению с данными видеопотока. С другой стороны, в речевом сигнале помехи не просто присутствуют всегда, а могут резко возрасти в процессе обработки сигнала, поэтому задача верификации диктора требует более тонкого подхода и тщательного решения.

Актуальность задач, возникающих в ходе реализации речевых технологий, не требует развернутого доказательства. Военные ведомства, спецслужбы и большинство предприятий, располагающие объектами, составляющими коммерческую и иную тайну, в большинстве стран используют зоны с ограничением доступа. Для обеспечения секретности и безопасности в такой зоне используют системы идентификации диктора. Эти

системы позволяют учреждениям ограничить доступ и выявлять наличие несанкционированных проникновений в защищенную зону. Система содержит базу данных голосов лиц, которые имеют доступ на защищенную территорию. Эти лица идентифицируются системой идентификации диктора, тем самым предотвращается доступ людей, чьих голосов нет в базе данных системы. ВВС США используют голосовые команды для управления самолетом. Кроме того, военные ведомства используют распознавание речи и систему Voice-to-text для коммуникации с гражданами в других странах. Например, американские военные активно используют системы распознавания речи в своих операциях в Ираке и Афганистане. Таким образом, существует высокий спрос на распознавание речи и голоса для военных целей.

Методы решения задачи верификации и трудности, возникающие при ее решении

Под задачей верификации диктора понимается задача определения принадлежности голоса на речевых данных определенному диктору. Отличие между задачей верификации диктора и близкой задачей идентификации диктора на ограниченном множестве голосов заключается в количестве моделей голосов зарегистрированных дикторов. В большинстве практических решений голосовых систем доступа задача верификации диктора является завершающей частью решения задачи идентификации диктора.

Верификация диктора предполагает бинарное решение, принадлежат ли произнесенные фрагменты одному и тому же уже известному диктору, чей голос присутствует на одном или нескольких записанных ранее фрагментах. Процесс получения образца голоса этого диктора, расчета и сохранения голосовой статистической модели является процессом регистрации диктора в системе доступа. Основная функция системы верификации диктора заключается в установлении степени соответствия голосовой модели зарегистрированного диктора речевым данным на тестовых произнесениях (рис. 1.). Записанное тестовое произнесение будем называть сообщением верификации.

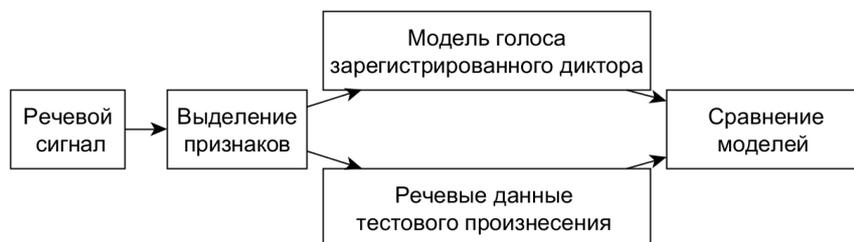


Рис.1. Структурная схема верификации

Даже в случае отсутствия помех первый источник погрешности в сравнении – возможное различие амплитудно-частотных характеристик записывающей аппаратуры и различные акустические свойства помещения

(спектральные характеристики поглощения звука и временные характеристики эха) при получении тестового произнесения и при регистрации диктора в системе.

Следующими причинами неидеальности процесса верификации являются аддитивные помехи (шумы) и использование разной аппаратуры записи и обработки сигналов (с различной нелинейностью характеристик) на этапах регистрации диктора в системе и верификации тестового произнесения.

В такой постановке задача верификации – задача принятия решения о наличии или отсутствии близости модели голоса зарегистрированного диктора (эталонной модели) и смеси «сигнал – помеха», где сигналом является совокупность признаков, выделенных из сообщения верификации в произвольном разрешающем объёме, становится эквивалентной задаче обнаружения сигнала[4].

Таким образом, формулируются две гипотезы: прямая гипотеза о близости с эталонной моделью и альтернативная гипотеза об отсутствии близости образцов с эталонной моделью. Каждая гипотеза может быть принята, при этом вероятность совершить ошибку - это уровень значимости соответствующей гипотезы, поэтому возможны следующие ситуации:

- правильное решение о близости тестового произнесения с эталонной моделью;
- правильное необнаружение близости тестового произнесения с эталонной моделью;
- пропуск близости тестового произнесения с эталонной моделью;
- ложное решение о близости тестового произнесения с эталонной моделью.

Два последних случая соответствуют ситуации ошибок первого и второго рода. Ошибки первого рода определяют вероятность ложного отказа (FRR, False Rejection Rate) и возникают при отказе в доступе зарегистрированному пользователю системы. Ошибки второго рода показывают вероятность ложного допуска (FAR, False Acceptance Rate) Вероятности этих ситуаций являются качественными показателями биометрических систем доступа, использующих алгоритмы верификации диктора. В реальных биометрических системах разброс этих характеристик может быть весьма значительным, прежде всего из-за различной окружающей акустической обстановки.

В теоретических исследованиях решение о принятии или отвержении гипотезы принимается на основе вычисления значения некоторой статистики и априорного знания уровня значимости гипотез. Однако на практике это вызывает определенные практические трудности, связанные с неоднозначностью распределения речевого сигнала. Поэтому пользуются условными вероятностями пропуска близости с эталонной моделью и ложного решения о близости с эталонной моделью, являющимися качественными показателями обнаружения при условии наличия или отсутствия близости модели.

Существующая неидеальность процесса верификации, в свою очередь, накладывает ограничения на предельные значения ошибок верификации в зависимости от соотношения «сигнал-помеха». На этапе проектирования системы нужно совершенно четко понять, каковы эти предельные значения, и какие реальные составляющие функциональной безопасности достижимы системой доступа при заданном отношении «сигнал - помеха» в случае варьирования ошибкой.

В тестовом произнесении априори содержится вся информация, необходимая для идентификации и верификации диктора, однако из-за сильной вариативности сигнала необходимо проведение предварительной обработки для выделения специфических признаков речевого сигнала с целью последующего анализа. Известно и используется в практических целях большое количество таких признаков. Наиболее популярными из них являются коэффициенты линейного предсказания [5] и кепстральные коэффициенты [6]. Статистические свойства речевого сигнала важны для вычисления признаков, используемых для самой верификации и для оценки ошибок верификации. На практике широко используются признаки, основанные на моментах второго порядка: спектр и автокорреляционная функция. В случаях, когда очевидно отсутствие нормального распределения речевого сигнала, используют моменты более высокого порядка, такие как асимметрия и эксцесс [7]. Решением задачи выбора признаков является построение модели диктора на основе смеси гауссовых распределений (СГР). СГР – подход, при котором речевой сигнал разбивается на фрагменты, в пределах каждого из которых распределение с достаточной для практических целей точностью является нормальным [7]. Принятие факта, что распределение сигнала в пределах каждого выбранного фрагмента тестового произнесения близко к нормальному, является важной отправной точкой для справедливости большинства соображений, изложенных ниже.

В процессе обработки сигнал неизбежно будет подвергаться нелинейным преобразованиям и «обогащаться» аддитивными помехами. В результате исходное отношение «сигнал – помеха» изменится, появится эквивалентное отношение «сигнал – помеха». На сегодняшний день серьезных исследований в области ухудшения эквивалентного отношения «сигнал – помеха» в системах обработки речевых сигналов нет. Предварительный анализ экспериментальных данных показывает, что это ухудшение может приводить к значительному увеличению ошибок верификации диктора.

Особенно внимательно следует подходить к процессу выравнивания эквивалентных характеристик устройств регистрации диктора и обработки тестового произнесения, так как этот процесс в силу нелинейности способен привести к обогащению спектра сигнала тестового произнесения новыми компонентами, которые по отношению к исходному сигналу будут помехой.

Алгоритм верификации диктора чаще всего использует для принятия решения энергетические и неэнергетические признаки сигнала в соответствии с классификацией [4].

Обоснование методики оценки вероятности ошибок 1-го и 2-го рода

Начнем с вероятности ошибки 2 рода [8], ошибки пропуска события (в нашем случае ошибки пропуска правильной верификации зарегистрированного диктора), при наличии помех. Понятие «помеха» вводится вместо понятия «шум», чтобы показать интегральный характер помехи. Помеха описывается суммой шумов при первичном преобразовании речевого сообщения, дополнительных спектральных компонент, возникающих вследствие преобразования и размножения спектра при нелинейной обработке исходного сигнала, и совокупности эхо-сигналов. Вследствие случайного характера помех принципиально невозможно добиться их полного устранения. Путём совершенствования алгоритмов обработки можно снизить вероятность ошибки пропуска события только до некоторого уровня. Пусть на выходе одного частотного канала имеется некий сигнал – случайный процесс[10]:

$$U(t) = V(t) + z(t),$$

где $V(t)$ - полезный сигнал, $z(t)$ - помеха.

Для решения вопроса о наличии сигнала в данный момент времени t можно принять правило: сигнал присутствует, если $U(t) > E$, т.е. превышает пороговое значение E , и что сигнал отсутствует в случае $U(t) \leq E$.

Ошибочный ответ может быть в двух несовместимых случаях:

1) когда сигнал отсутствует, $V(t) = 0$, но значение помехи превышает E . Обозначим это событие A = «ложная тревога».

2) Когда сигнал присутствует, $V(t) \neq 0$, но сумма сигнала и помехи не превышает уровня E . Обозначим это событие B , «пропуск сигнала».

Итак,

$$P(A) = P(A1)P(A2),$$

где событие $A1$ – отсутствие сигнала, событие $A2$ –превышение помехой уровня E при отсутствии сигнала. Пусть $P(A1) = q$, тогда по одномерной функции распределения помехи $W(x)$

$$P(U > E) = \int_E^{\infty} W(x)dx,$$

и

$$P(A) = q \int_E^{\infty} W(x)dx.$$

Аналогично,

$$P(B) = P(B1)P(B2),$$

где $B1$ – присутствие сигнала, $B2$ – неперевышение суммарной энергией уровня E , при этом

$$P(B1) = 1 - q.$$

Апостериорную вероятность неперевышения уровня E можно получить, используя одномерную функцию распределения суммы сигнала и помехи $W_1(x, V)$.

$$P(U \leq E) = \int_{-\infty}^E W_1(x, V) dx, \quad (1)$$

Тогда $P(B) = p \int_{-\infty}^E W_1(x, V) dx$.

Так как события A и B несовместны, то вероятность ошибочного ответа

$$P(A \text{ or } B) = P(A) + P(B) = \\ = q \int_E^{\infty} W(x) dx + p \int_{-\infty}^E W_1(V, x) dx = 1 - \left[p \int_E^{\infty} W_1(V, x) dx + q \int_{-\infty}^E W(x) dx \right]$$

и вероятность правильного ответа P_0 равна:

$$P_0(E, V) = 1 - P(A \text{ или } B) = p \int_E^{\infty} W_1(x, V) dx + q \int_{-\infty}^E W(x) dx. \quad (2)$$

Теперь поставим задачу нахождения оптимальной величины порога E , для которого вероятность правильного ответа (2) при заданных функциях распределения сигнала и помехи максимальна. Вычисляя производную выражения (2) по E и приравнявая её нулю, получаем уравнение для определения оптимального уровня:

$$\frac{dP(E)}{dE} = 0, \Rightarrow qW(E) = pW_1(E, V).$$

Плотности распределения будут иметь вид:

$$W(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{U^2}{2\sigma^2}\right), \quad W_1(U, V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(U-V)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Это справедливо, например, для положительного импульса с амплитудой V на фоне помехи.

Заметим, что в случае, когда априорная вероятность появления сигнала неизвестна, часто полагают $p=1/2$, считая, что априорно равновероятно, как наличие, так и отсутствие сигнала, при этом $q=1/2$. Тогда для описанных распределений величина порога E равна $V/2$.

Если уровень E выбран, то для вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала, используя ранее приведенные формулы, получаются выражения:

$$P_{лт} = q \left[1 - \Phi\left(\frac{E}{\sigma}\right) \right], \quad P_{пр} = p \left[1 - \Phi\left(\frac{U-E}{\sigma}\right) \right], \quad (3)$$

где $\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$ - функция Крампа.

При использовании критерия обнаружения Неймана-Пирсона вероятность ложной тревоги фиксируется изначально. Так как вероятность ложной тревоги функционально связана с относительным порогом, то последний также оказывается заданным.

Для минимизации вероятности ошибочного решения необходимо удовлетворить одновременно двум противоречивым требованиям:

1) чтобы вероятность $P(B)$ пропуска сигнала не превосходила некоторой величины: $P(B) < K$,

2) чтобы вероятность $P(A)$ ложной тревоги была минимальна.

Численный анализ взаимозависимости и практический пример использования методики оценки ошибок 1 и 2 рода

Для выбора порога обнаружения примем предположение, что распределение смеси сигнала и помехи – нормальное: $M=0$, $\sigma=1$. Рассчитаем зависимость вероятности ложной тревоги от величины порога с помощью программы для Matlab [9]. В программе используется встроенная функция *erf*[10].

```
x=1:0.01:5;
P1 = test_Plt(x);
semilogy(x,P1);
grid on;
title(' ');
xlabel('Threshold');
ylabel('Error 1, 1/s');
function P1=test_Plt(E)
p=0.5;
q=1-p;
sigma=1;
P1=q*(1-erf(E/sigma));
```

В результате выполнения программы получим следующую зависимость вероятности ложной тревоги от величины порога в значениях дисперсии шума случайного процесса σ при отсутствии сигнала:

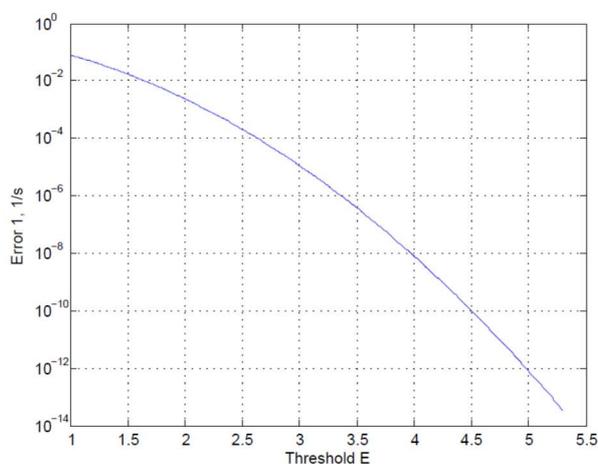


Рис. 2. Зависимость вероятности ложной тревоги от величины порога

Расчеты по (3) (рис. 2) показывают, что для достижения вероятности ложной тревоги 10^{-5} достаточно установить порог обнаружения 3σ , где σ - дисперсия помехи при отсутствии сигнала.

Чтобы при заданном пороге обнаружения найти вероятность пропуска цели, снова проведем расчеты, но в качестве функции для расчета значений возьмем функцию Р пр (3):

В результате расчета получим следующую зависимость вероятности пропуска цели от отношения сигнал-помеха (ОСП) и зависимость от порога при заданном ОСП, равном 3σ (рис. 3):

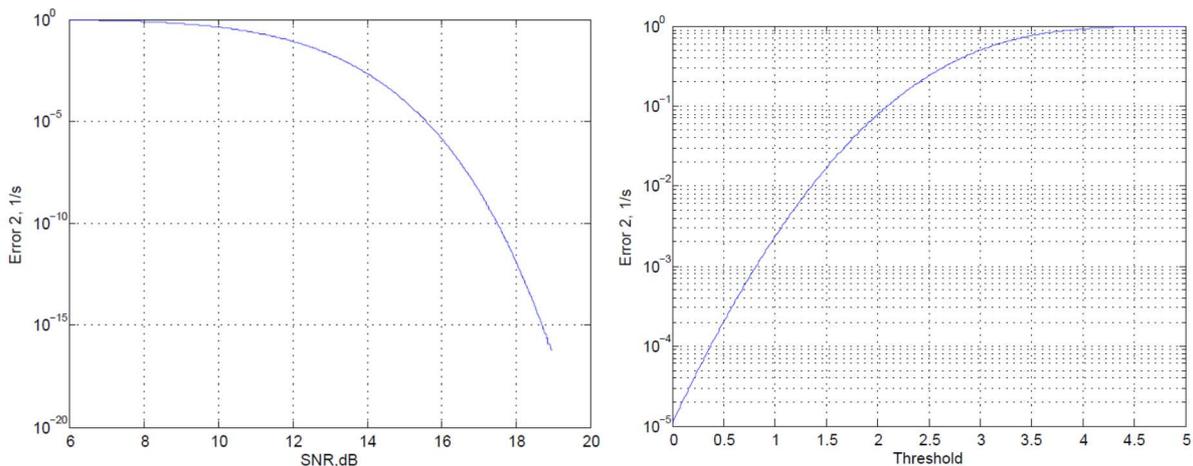


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки 2 рода от отношения сигнал-помеха (слева) и зависимость вероятности ошибки 2 рода от порога при заданном отношении сигнал – помеха 3σ (справа)

На рис.3 (слева) видно, что при ОСП 17 дБ вероятность ошибки 2 рода (пропуска цели) составляет менее 10^{-8} , и резко снижается при увеличении ОСП. Таким образом, для минимизации вероятности ошибки 2 рода при фиксации ошибки 1 рода необходимо уменьшать ОСП сигнала до значений, определенных зафиксированным значением вероятности ложной тревоги (ошибки 1 рода). Можно определить граничное значение отношения сигнал – помеха.

Возникают ситуации, когда необходимо решить иную задачу: при фиксированном значении ошибки 2 рода минимизировать ошибку 1 рода. Если вероятности наличия и отсутствия специфических признаков сигнала равновероятны, выражения (2) и (3) остаются в силе и для данной задачи.

Вычисление зависимости ошибки пропуска цели от порога аналогично приведенным выше программам на Matlab и осуществляется в соответствии с (3). При этом порядок действий оказывается неудобным: для построения зависимости ошибки 2 рода от порога требуется априорное знание ОСП. Если задать исходное ОСП равным 3σ , то зависимость ошибки 2 рода от порога будет иметь вид рис. 3 (справа).

Удобнее пользоваться методикой, обоснованной выше, при фиксации вероятности ошибки 1 рода и минимизации вероятности ошибки 2 рода, сделав ее итеративной:

1. Производим расчет и построение зависимости вероятности ложной тревоги от величины порога (рис 2. и соответствующая программа Matlab).

2. Фиксируем некое произвольное значение вероятности ложной тревоги, рассчитываем или выбираем по графику п.1 значение порога.

3. По значению порога производим расчет зависимости вероятности ошибки 2 рода от ОСП и строим соответствующий график.

4. На полученной зависимости фиксируем точку необходимой величины вероятности ошибки 2 рода и в соответствии с п.1 и п.2 предложенной методики выбираем возможные пути минимизации ошибки 1 рода.

Ниже приведена использованная для практических целей иллюстрация описанной методики.

Пусть зафиксировано значение вероятности ошибки 2 рода

0,001. Требуется минимизировать вероятность ошибки 1 рода при значении ОСП 14 дБ.

1. Рассчитываем и строим график зависимости вероятности ошибки 1 рода от величины порога (рис.2).

2. Фиксируем вероятность ошибки 1 рода на том же уровне, что и вероятность ошибка 2 рода: 0,001.

Значение порога приблизительно составит : $E = 2,3$.

3. Для данного значения порога рассчитываем и строим зависимость ошибки 2 рода от отношения сигнал – помеха (рис. 4).

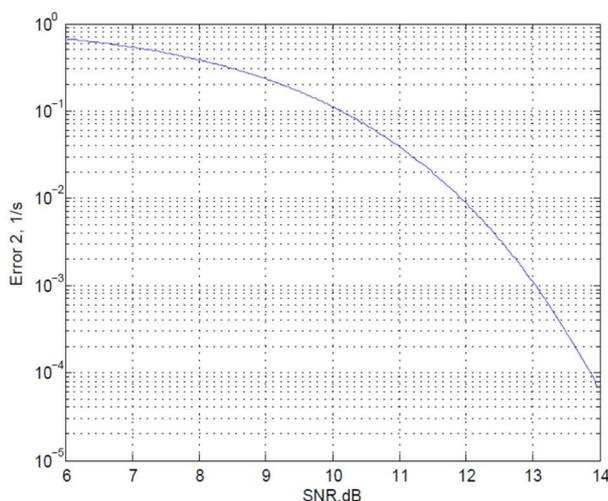


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки 2 рода от отношения сигнал-помеха, порог $E = 2,3$

На основании рис.4 можно сделать вывод, что для достижения вероятности ошибки 2 рода 10^{-3} необходимое значение ОСП 13 дБ.

Уменьшим исходное значение вероятности ошибки 1 рода до 10^{-4} . На графике рис. 2 значение порога составит $E=2.7$.

Примем значение порога $E=2.8$ (с целью получить небольшой «перелет»). График вероятности ошибки 2 рода для порога $E=2.8$ приведен на рис. 5. Непосредственные расчеты по (2) и (3) дают следующие значения: при исходном значении отношения сигнал – помеха 14 дБ вероятность ошибки 2 рода: $8.7 \cdot 10^{-4}$, вероятность ошибки 1 рода минимизирована до $6,46 \cdot 10^{-4}$. Результат достигнут за 2 итерации.

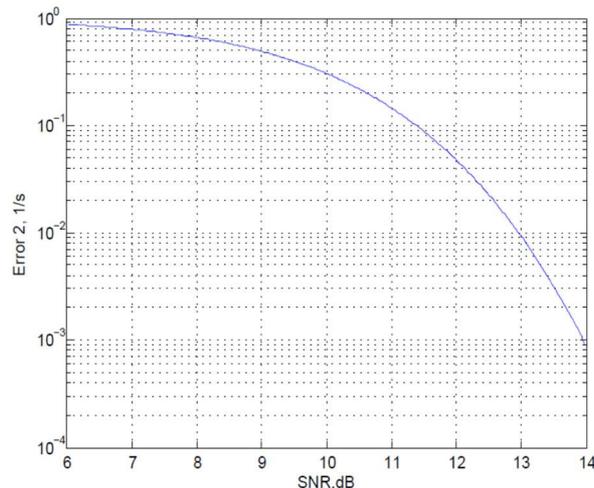


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки 2 рода от отношения сигнал-помеха, порог $E = 2,8$

Анализ показывает, что для уменьшения ошибки 1 рода, как правило, необходимо повышать значение порога. Для сохранения исходного значения вероятности ошибки 2-го рода необходимо повышать отношение сигнал-помеха. Приведенный пример показал, что для получения приемлемого результата может потребоваться несколько итераций.

Показанная методика дает возможность проведения предварительных инженерных расчетов, необходимых при первичном определении требований к системе допуска, или оценки предельных значений вероятности ошибок для уже существующих систем при попытке улучшить качественные характеристики путем изменения алгоритмов обработки и верификации.

При необходимости автоматизации указанной методики есть возможность разработки программы расчетов, реализующей описанный выше итеративный процесс.

Заключение

1. Предложена методика оценки ошибки ложного допуска биометрической системы верификации диктора на основе поочередной фиксации эквивалентного отношения «сигнал-помеха» и ошибки ложного отказа в доступе.

2. Данная методика позволяет оценить предельные допустимые значения любых двух других параметров при фиксации значения третьего параметра с достаточной для практической оценки точностью.

3. Для достоверности оценки по предложенной методике необходимо, чтобы в системе верификации использовалась модель признаков голоса диктора на основе смеси гауссовых распределений (СГР).

4. Необходимо знать состав признаков голосовой модели и при существенном отличии признаков сообщения верификации и соответствующей ему модели зарегистрированного диктора принять меры к выравниванию акустических характеристик и нелинейности узла регистрации и узла верификации системы доступа.

5. При необходимости автоматизации процесса расчетов возможно создание программы на основе предложенной методики оценки.

Список литературы

1. Скляр В.В. Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами. Методическое пособие / Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 384 с.

2. Интернет вещей (IoT) – вызовы новой реальности [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/company/gemaltorussia/blog/281619> (дата обращения: 24.06.2018).

3. ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования [Электронный ресурс] URL: <http://meganorm.ru/Data2/1/4293776/4293776878.pdf> (дата обращения: 22.06.2018).

4. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.

5. Rabiner L. Fundamentals of speech recognition / L.Rabiner, B.-H. Juang // Prentice-Hall. Inc., 1993.

6. Nemer E. Speech enhancement using fourth-order cumulants and optimum filters in the subband domain / E.Nemer, R.Goubran, S. Mahmoud // Speech Communication, 2002. Vol. 36, №. 3. P. 219–246.

7. Пекарь Д.В., Тихоненко С. Г. Алгоритм использования гауссовых смесей для идентификации диктора по голосу в технических системах / Информационные технологии, электронные приборы и системы (ITEDS'2010): Материалы Международной научно-практической конференции, 6–7 апреля 2010 г., Минск / Белорусский государственный университет. Минск, 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/28611> (дата обращения: 22.06.2018).

8. Бибииков С.В. Оценка функциональной безопасности обнаружения виброакустического сигнала приближающегося поезда / С.В Бибииков, Ю.Н. Матвеев, Н.Н. Семенов // Изв. вузов. Приборостроение, 2014. №2(57). С. 47–52.

9. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс / СПб: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. 512 с.

10. Бибииков С.В. Алгоритмы и устройства системы оповещения о приближении поезда по виброакустическим колебаниям рельса. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук / СПб.: Университет ИТМО, 2015. [Электронный ресурс] URL: http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=164469 (дата обращения: 21.06.2018).

Бибииков Сергей Викторович, канд. техн. наук, доцент, sbib@bk.ru, Россия, Санкт-Петербург, Университет ИТМО,

Певнева Анна Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент, pevnevaa@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно – космическая академия им. А.Ф. Можайского,

Халиков Эльдар Мавлютович, канд. техн. наук, начальник отдела, Россия, khalikov.eldar@yandex.ru, Санкт-Петербург, Военно – космическая академия им. А.Ф. Можайского

THE ESTIMATION TECHNIQUE OF THE VERIFICATION ALGORITHM QUALITY INDICATORS FOR BIOMETRIC ACCESS SYSTEMS

S.V.Bibikov, A.G.Pevneva, E.M. Khalikov

The technique of quality indicators estimation of the algorithm of the speaker verification biometric system for the purpose of an assessment of the access systems functional safety is offered. The technique is developed on the basis of radiotechnical systems noise immunity theory.

Key words: biometric access systems, speaker verification, the assessment of access errors, functional safety.

Bibikov Sergei Viktorovich, candidate of technical science, docent, sbib@bk.ru, Russia, Saint-Petersburg, ITMO University,

Pevneva Anna Gennadijevna, candidate of technical science, docent, pevnevaa@inbox.ru, Russia, Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Khalikov Eldar Mavlyutovich, candidate of technical science, head of department, khalikov.eldar@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

МОДЕЛЬ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ, ПОСТРОЕННОЙ НА КРУГОВЫХ ОРБИТАХ РАВНОГО РАДИУСА

И.А. Фадин, В.И. Горбулин, А.А. Матвеев

Предложена модель, позволяющая на основе исходных данных о параметрах движения космических аппаратов-измерителей определить пространственные и временные параметры зон двойного обзора орбитальной системы мониторинга космической обстановки в частном случае при движении всех космических аппаратов-измерителей по круговым орбитам равного радиуса и наклона.

Ключевые слова: мониторинг космической обстановки, модель, динамический метод космической триангуляции.

Результатом активного использования околоземного космического пространства (ОКП) является его засорение объектами искусственного происхождения [1]. Для исключения возможности столкновения действующих космических аппаратов (КА) с космическим мусором применяется система контроля космического пространства (СККП) [2, 3]. Особенно велика концентрация космического мусора в области ОКП, соответствующей низким околоземным орбитам [4], что предъявляет высокие требования по оперативности контроля космической обстановки в указанной области [5]. В ряде работ [5–8] показано, что данные требования могут быть обеспечены путём комплексирования существующей СККП и орбитальной системы мониторинга космической обстановки (ОСМКО).

Результаты анализа научно-методического аппарата (НМА) в области обоснования способа функционирования и баллистической структуры перспективной ОСМКО [5-8] показывают, что совокупность полученных к настоящему времени результатов направлена на обоснование характеристик системы, функционирующей на основе метода космической триангуляции, когда определение параметров движения космического объекта (КО) происходит в зонах двойного обзора бортовых оптикоэлектронных приборов (БОЭП) КА-измерителей (КАИ). При этом предполагается формирование зон двойного обзора лишь между соседними КАИ, движущимися в одной орбитальной плоскости. Между тем, результаты моделирования показывают возможность повышения качества функционирования ОСМКО при создании зон двойного обзора между аппаратами, движущимися в разных плоскостях, т.е. при использовании динамического метода космической триангуляции [5].

В [5] выявлена научная проблема, состоящая в отсутствии НМА обоснования баллистической структуры, способа применения и характеристик ОСМКО на полном множестве альтернатив. Вместе с тем, мощность

множества всех вариантов построения системы равна мощности множества \mathbb{C} (континуум) [5]. В связи с невозможностью аналитического выражения показателей эффективности функционирования ОСМКО через входные данные (что обусловлено сложностью расчёта этих показателей), задачу обоснования структуры перспективной ОСМКО предлагается решать с помощью методов математического моделирования. При этом задача поиска оптимального решения на множестве \mathbb{C} имеет бесконечную временную сложность.

Для уменьшения временной сложности задачи принято непрерывное множество вариантов баллистического построения системы задавать в виде дискретного, ограничившись определённым набором входных параметров с конечным шагом изменения.

С учётом того, что основу метода космической триангуляции составляет определение координатных и некоординатных параметров КО при его нахождении в зонах двойного обзора БОЭП КАИ, орбиты последних целесообразно делать солнечно-синхронными с одинаковым радиусом, что позволит упростить решение проблемы засветки целевой аппаратуры со стороны Солнца.

Для обоснования конструктивного облика космического аппарата-измерителя необходимо определить параметры областей пространства, в пределах которых может вестись обнаружение КО, а именно размеры и положение этих областей относительно КАИ. Данные параметры определяются на основе характеристик БОЭА, а именно предельной дальности обнаружения КО $D_{\text{сопр}}$, и относительного положения КАИ, образующих зоны двойного обзора (рис. 1).

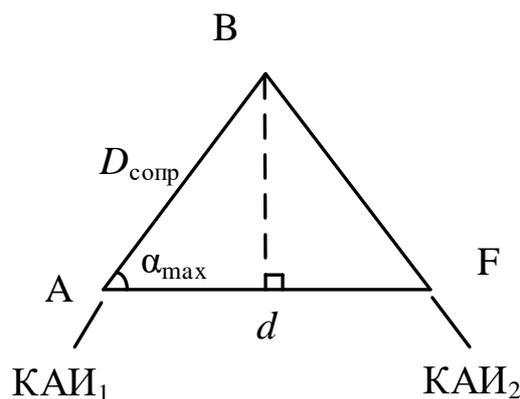


Рис. 1. К задаче определения условий функционирования БОЭП КАИ

На рис. 1 $D_{\text{сопр}}$ – максимальная дальность обнаружения КО БОЭП, d – расстояние между двумя КАИ, α_{max} – предельное значение угла между линией визирования КАИ – КАИ и КО, находящимся в зоне двойного обзора.

Определение угловой динамика линии визирования (АВ) позволит задать исходные данные для решения следующих задач:

- управления БОЭП;
- обоснования количества и расположения БОЭП;
- обоснования параметров ориентации КА в целом.

Таким образом, предлагаемая модель ОСМКО предназначена для определения временных параметров существования зон двойного обзора и угловых параметров линии визирования между двумя КАИ при образовании указанных зон в случае, когда все КАИ движутся по круговым орбитам одинакового наклона и радиуса.

При решении научной задачи разработки модели ОСМКО на множестве круговых орбит одинакового радиуса в центральном поле Земли может быть использован методический подход, позволяющий получить аналитические зависимости для угловых параметров ориентации линии визирования КАИ – КАИ, движущихся в разных орбитальных плоскостях, при образовании зон двойного обзора. Суть обозначенного подхода заключается в использовании того факта, что линия визирования двух заданных КАИ всегда перемещается в пространстве параллельно некоторой плоскости – псевдоэкватору [9]. В представленной на рис. 2 системе координат (СК) вектор нормали к псевдоэкватору

$$\vec{n} = \left(1, -\operatorname{tg} \frac{u_{02}}{2}, \operatorname{tg} \frac{u_{02}}{2} \operatorname{ctg} \frac{i}{2} \right)^T,$$

где u_{02} – аргумент широты второго КА (точка В) момент времени $t = 0$, когда первый КА (точка А) находился в точке С – точке пересечения орбит двух КА.

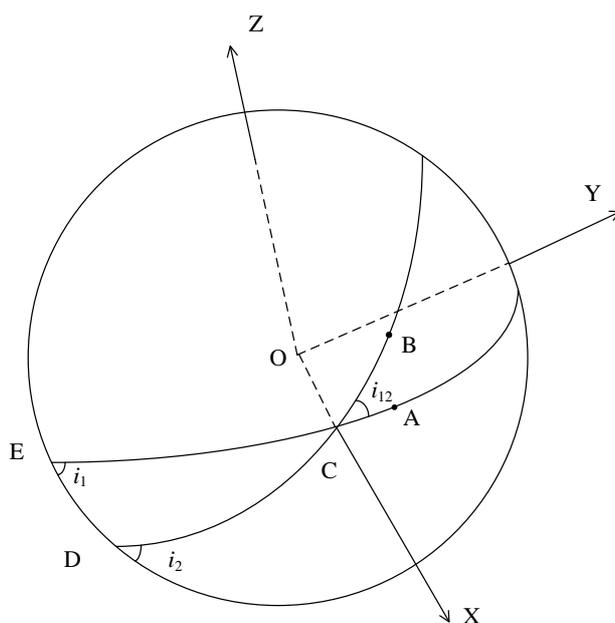


Рис. 2. К задаче определения положения псевдоэкватора: О – центр Земли

Представленная СК (СК, соответствующая двум КАИ (1 и 2), движущимся по некомпланарным орбитам – СК₁₂) введена следующим образом. Начало координат совпадает с центром Земли, ось OX направлена через точку пересечения орбит на восходящем витке, ось OZ – по вектору орбитального момента первого КА, OY дополняет систему координат до правой тройки.

В сферическом ΔEDC

$$\check{ED} = \Omega_2 - \Omega_1 = \Delta\Omega_{12},$$

где Ω_1 и Ω_2 – долготы восходящих узлов первого и второго КА соответственно, тогда

$$\cos i_{12} = \cos i_1 \cos i_2 + \sin i_1 \sin i_2 \cos \Delta\Omega_{12}. \quad (1)$$

Из соотношения для пяти элементов сферического треугольника с учётом $i_1 = i_2$

$$\cos \check{DC} = \frac{\sin i_1 \cos \Delta\Omega_{12} - \sin i_1 \cos i_{12}}{-\cos i_1 \sin i_{12}} = \frac{\cos i_{12} - \cos \Delta\Omega_{12}}{\sin i_{12}} \operatorname{tg} i_1. \quad (2)$$

По теореме косинусов

$$\cos \check{EC} = \cos \check{DC} \cos \Delta\Omega_{12} - \sin \check{DC} \sin \Delta\Omega_{12} \cos i_2. \quad (3)$$

Выбранная СК позволяет применить аппарат орбитальных карт [10] для определения временных параметров формирования зон двойного обзора. При этом время существования зоны двойного обзора между j -ым и k -ым КАИ определяется как совокупность интервалов времени T_{jk} , на которых для каждого момента времени справедливо неравенство

$$d_{jk}(t) \leq 2D_{\text{сопр}}, \quad (4)$$

$$T_{jk} = \bigcup_{l=1}^{L_{jk}} [t_{\text{H}jk}^l, t_{\text{K}jk}^l],$$

где d_{jk} – расстояние между двумя КАИ; l – условный номер зоны двойного обзора в пределах рассматриваемой пары КАИ; L_{jk} – суммарное количество событий образования зон двойного обзора с участием рассматриваемых КАИ; $t_{\text{H}jk}^l$ – время начала существования l -ой зоны двойного обзора между j -ым и k -ым КАИ; $t_{\text{K}jk}^l$ – время окончания существования l -ой зоны двойного обзора между j -ым и k -ым КАИ.

В сферическом ΔABC в момент образования и прекращения существования зоны двойного обзора между рассматриваемыми КА ($t_{jk}^{\text{ДВ}}$)

$$\check{AB} = \frac{D_{\text{сопр}}}{r}, \quad (5)$$

где r – радиус орбиты КАИ. С другой стороны, по теореме косинусов

$$\cos \check{AB} = \cos \check{CA} \cos \check{CB} + \sin \check{CA} \sin \check{CB} \cos i. \quad (6)$$

Принимая во внимание, что

$$\check{C}A = u_{jk}^{0j} + \omega t,$$

$$\check{C}B = u_{jk}^{0k} + \omega t,$$

уравнение (6) с учётом (5) преобразуется к виду

$$\cos\left(u_{jk}^{0j} + u_{jk}^{0k} + 2\omega t_{jk}^{дв}\right) = \frac{2 \cos \frac{D_{сопр}}{r} - (1 + \cos i_{jk}) \cos\left(u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k}\right)}{1 - \cos i_{jk}}, \quad (7)$$

где u_{jk}^{0j} – значение аргумента широты j -го КАИ в СК $_{jk}$ в начальный момент времени; u_{jk}^{0k} – значение аргумента широты k -го КАИ в СК $_{jk}$ в начальный момент времени; ω – угловая скорость движения КАИ (одинакова для всех КАИ). Из (7)

$$u_{jk}^{0j} + u_{jk}^{0k} + 2\omega t_{jk}^{дв} = \pm \arccos \frac{2 \cos \frac{D_{сопр}}{r} - (1 + \cos i_{jk}) \cos\left(u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k}\right)}{1 - \cos i_{jk}} + 2\pi l,$$

$$t_{jk}^l = \frac{\pm \arccos \frac{2 \cos \frac{D_{сопр}}{r} - (1 + \cos i_{jk}) \cos\left(u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k}\right)}{1 - \cos i_{jk}} - u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k} + 2\pi l}{2\omega}, \quad (8)$$

где t_{jk}^l – времена образования и исчезновения зон двойного обзора между КАИ, движущимися в разных орбитальных плоскостях.

Если КАИ движутся в одной орбитальной плоскости, то выражение (8) нельзя применять для определения временных интервалов существования зон двойного обзора между рассматриваемыми КАИ, т.к. в этом случае производится деление на ноль ($\cos i_{jk} = 1$). В этом случае при невозмущённом движении расстояние между двумя КА остаётся неизменным (на рис. 3 $\angle AOB = |u_{0j} - u_{0k}| = \text{const}$), и зона двойного обзора с участием рассматриваемых КАИ либо существует постоянно, если выполняется условие

$$2r \sin \frac{\angle AOB}{2} < 2D_{сопр},$$

либо никогда, если данное условие не выполняется.

Правая часть уравнения (7) может быть использована для анализа временных параметров зон двойного обзора. Если выполняется условие

$$\frac{2 \cos \frac{D_{сопр}}{r} - (1 + \cos i_{jk}) \cos\left(u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k}\right)}{1 - \cos i_{jk}} \geq 1,$$

то зона двойного обзора между j -ым и k -ым КАИ существует постоянно,

если

$$\frac{2 \cos \frac{D_{\text{сопр}}}{r} - (1 + \cos i_{jk}) \cos(u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k})}{1 - \cos i_{jk}} < -1,$$

то рассматриваемые КАИ никогда не образуют зону двойного обзора.

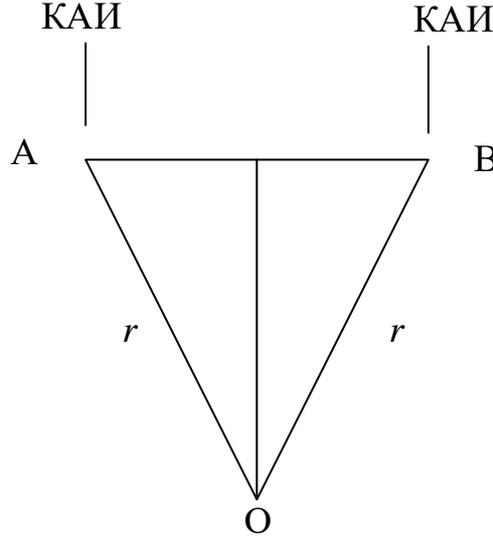


Рис. 3. К задаче определения расстояния между двумя КАИ, движущимися в одной орбитальной плоскости

При заданном значении l момент времени

$$t_{\text{нjk}}^l = \frac{-\arccos \frac{2 \cos \frac{D_{\text{сопр}}}{r} - (1 + \cos i_{jk}) \cos(u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k})}{1 - \cos i_{jk}} - u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k} + 2\pi l}{2\omega}$$

соответствует началу образования зоны двойного обзора,

$$t_{\text{кjk}}^l = \frac{\arccos \frac{2 \cos \frac{D_{\text{сопр}}}{r} - (1 + \cos i_{jk}) \cos(u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k})}{1 - \cos i_{jk}} - u_{jk}^{0j} - u_{jk}^{0k} + 2\pi l}{2\omega}$$

окончанию.

С учётом допущения, что рассматриваемые КАИ движутся по круговым орбитам одинакового наклонения, формула (1) преобразуется к виду

$$\cos i_{jk} = \cos^2 i_1 + \sin^2 i_1 \cos \Delta \Omega_{jk},$$

где

$$\Delta \Omega_{jk} = \Omega_k - \Omega_j.$$

В СК_{jk}, соответствующей движению *k*-го КАИ относительно *j*-го, координаты *j*-го КАИ

$$\vec{r}_{jk}^j(t) = r \begin{pmatrix} \cos(u_{jk}^{0j} + \omega t) \\ \sin(u_{jk}^{0j} + \omega t) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$u_{jk}^{0j} = u_j^0 - \check{E}C_{jk},$$

где u_j^0 – аргумент широты *j*-го КАИ в АГЭСК в начальный момент времени. В соответствии с рис. 1 и уравнением (3)

$$\check{E}C_{jk} = \arccos(\cos \check{D}C_{jk} \cos \Delta\Omega_{jk} + \sin \check{D}C_{jk} \sin \Delta\Omega_{jk} \cos i_{jk}).$$

Здесь

$$\check{D}C_{jk} = \arccos \frac{(\cos i_{jk} - \cos \Delta\Omega_{jk}) \operatorname{tg} i_1}{\sin i_{jk}},$$

$$i_{jk} = \arccos(\cos^2 i_1 + \sin^2 i_1 \cos \Delta\Omega_{jk}).$$

Координаты *k*-го КАИ в СК_{jk}

$$\vec{r}_{jk}^k(t) = r \begin{pmatrix} \cos(u_{jk}^{0k} + \omega t) \\ \sin(u_{jk}^{0k} + \omega t) \cos i_{jk} \\ \sin(u_{jk}^{0k} + \omega t) \sin i_{jk} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$u_{jk}^{0k} = u_k^0 - \check{D}C_{jk}.$$

Угловая ориентация линии визирования *j*-го КАИ при образовании зоны двойного обзора с *k*-ым КАИ в СК_{jk}

$$\vec{r}_{jk}^{\text{отн}}(t) = \vec{r}_{jk}^k(t) - \vec{r}_{jk}^j(t) \quad (11)$$

с учётом условия (4). При этом

$$d_{jk}(t) = \left| \vec{r}_{jk}^{\text{отн}}(t) \right|. \quad (12)$$

Для определения динамики линии визирования вводится сферическая СК (ССК_{jk}), начало которой совпадает с точкой нахождения *j*-го КАИ на орбите, фундаментальная плоскость совпадает с плоскостью орбиты *j*-го КАИ, начало отсчёта азимутального угла – прямая, параллельная ОХ СК_{jk} – АХ_{ССК} (рис. 4). На рис. 4 оси АХ_{ССК}, АУ_{ССК} и АZ_{ССК} получены параллельным переносом соответствующих осей СК из точки О в точку А. Положительное направление отсчёта азимутального угла – от АХ_{ССК} к АУ_{ССК}. Положительное направление отсчёта широты – в направлении АZ_{ССК}.

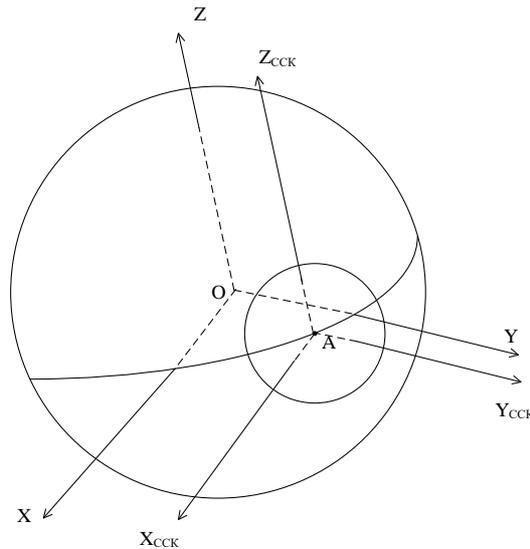


Рис. 4. Введение сферической системы координат

В соответствии с введённым понятием псевдоэкватора линия визирования с j -го КАИ на k -ый всегда перпендикулярна

$$\vec{n}_{jk} = \left(1, -\operatorname{tg} \frac{u_{jk}^{0k}}{2}, \operatorname{tg} \frac{u_{jk}^{0k}}{2} \operatorname{ctg} \frac{i_{jk}}{2} \right)^T \quad (\text{координаты заданы в } СК_{jk}). \text{ Так как ко-}$$

ординаты данного вектора сохранятся при параллельном переносе $СК_{jk}$ в $ССК_{jk}$, то траектория линии визирования в $ССК_{jk}$ будет лежать в пределах большого круга, плоскость которого перпендикулярна \vec{n}_{jk} . Наклонение указанной плоскости к плоскости $ХОУ$ $ССК_{jk}$

$$\begin{aligned} i_{jk}^{\text{ПЭ}} &= \arccos \frac{\operatorname{tg} \frac{u_{jk}^{0k}}{2} \operatorname{ctg} \frac{i_{jk}}{2}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{u_{jk}^{0k}}{2} + \operatorname{tg}^2 \frac{u_{jk}^{0k}}{2} \operatorname{ctg}^2 \frac{i_{jk}}{2}}} = \\ &= \arccos \frac{\operatorname{tg} \frac{u_{jk}^{0k}}{2} \operatorname{ctg} \frac{i_{jk}}{2}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{u_{jk}^{0k}}{2} \left(1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{i_{jk}}{2} \right)}} = \arccos \frac{\operatorname{tg} \frac{u_{jk}^{0k}}{2} \operatorname{ctg} \frac{i_{jk}}{2}}{\sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \frac{i_{jk}}{2}} \operatorname{tg}^2 \frac{u_{jk}^{0k}}{2}}} = \\ &= \arccos \frac{\operatorname{tg} \frac{u_{jk}^{0k}}{2} \cos \frac{i_{jk}}{2}}{\sqrt{\sin^2 \frac{i_{jk}}{2} + \operatorname{tg}^2 \frac{u_{jk}^{0k}}{2}}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Угол между осью X $ССК_{jk}$ и линией пересечения плоскости большого круга, в пределах которого движется линия визирования с j -го КАИ на k -ый, (аналог долготы восходящего угла в кеплеровских элементах орбиты) определяется из соотношения

$$\Omega_{jk} = \arccos \frac{\operatorname{tg} \frac{u_{jk}^{0k}}{2}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{u_{jk}^{0k}}{2}}} = \arccos \left(\sin \frac{u_{jk}^{0k}}{2} \right) = \frac{\pi}{2} - \frac{u_{jk}^{0k}}{2}. \quad (14)$$

Вторая точка диаметрально противоположна указанной.

При переходе из СК в $ССК$ также сохраняются координаты вектора $\vec{r}_{jk}^{\text{отн}}$ (11). Широта φ_{jk} и долгота λ_{jk} линии визирования в $ССК_{jk}$ определяются из соотношений

$$\varphi_{jk} = \arcsin \frac{r_{jzk}^{\text{отн}}}{d_{jk}}, \quad (15)$$

$$\cos \lambda_{jk} = \frac{r_{jkx}^{\text{отн}}}{\sqrt{(r_{jkx}^{\text{отн}})^2 + (r_{jky}^{\text{отн}})^2}}, \quad (16)$$

$$\sin \lambda_{jk} = \frac{r_{jky}^{\text{отн}}}{\sqrt{(r_{jkx}^{\text{отн}})^2 + (r_{jky}^{\text{отн}})^2}}, \quad (17)$$

где $r_{jkx}^{\text{отн}}, r_{jky}^{\text{отн}}, r_{jzk}^{\text{отн}}$ – проекции $\vec{r}_{jk}^{\text{отн}}$ на оси X, Y и Z $ССК_{jk}$ соответственно.

Начало и конец дуги, соответствующей динамике линии визирования КАИ _{j} – КАИ _{k} в $ССК_{jk}$ за время существования зоны двойного обзора, определяется по соотношениям (15)–(17) на моменты времени t_{ijk} и t_{kjk} . Причём, в соответствии с уравнениями (9)–(11), ориентация линии визирования будет повторяться с периодом, равным периоду обращения КАИ по орбите, а через половину оборота линия визирования развернётся на 180° .

При определении угловых параметров движения линии визирования между текущим j -ым КАИ и всеми остальными по формулам (13), (14) используются различные $ССК$ ($ССК_{jk}$ и $ССК_{jp}$), образованные от соответствующих $СК_{jk}$. Все эти системы повернуты друг относительно друга по оси OZ $СК_{jk}$ на угол

$$\Delta \lambda_{kp}^j = \check{E}C_{jp} - \check{E}C_{jk}, \quad (18)$$

где в соответствии с выражениями (2), (3) и рис. 1

$$\check{E}C_{jp} = \arccos(\cos \check{D}C_{jp} \cos \Delta \Omega_{jp} - \sin \check{D}C_{jp} \sin \Delta \Omega_{jp} \cos i_p), \quad (19)$$

$$\check{D}C_{jp} = \arccos \left(\frac{\cos i_{jp} - \cos \Delta \Omega_{jp} \operatorname{tg} i_j}{\sin i_{jp}} \right). \quad (20)$$

Динамику линии визирования j -го КАИ на другие КАИ удобнее рассматривать в одной системе отсчёта – $ССК_{jq}$, где q – номер любого КАИ, движущегося в той же орбитальной плоскости, что и j -ый КАИ. В этом случае ось OX $СК_{jq}$ направлена через восходящий узел орбиты j -го КАИ ($\check{E}C_{jq} = 0$, $\check{D}C_{jq} = 0$). Переход из всех остальных $ССК_{jk}$ в $ССК_{jq}$ осуществляется в соответствии с соотношениями (18)–(20). Данный переход эквивалентен повороту плоскости, в пределах которой движется линия визирования, по долготе на угол $\Delta\lambda_{kq}^j$.

Структурная схема разработанной модели представлена на рис. 5.

Входными данными для модели являются:

радиус орбит КАИ – r ;

наклоны орбит КАИ – i ;

максимальная дальность обнаружения КО БОЭП – $D_{сопр}$;

значения аргументов широт и долгот восходящих узлов каждого КАИ в начальный момент времени $R = \{u_{0j}, \Omega_j, j = 1..J\}$, где J – количество КАИ;

интервал моделирования;

шаг моделирования.

Выходными данными модели являются:

временные интервалы существования зон двойного обзора для каждой пары КАИ – T_{jk} ;

ориентация линии визирования j -го КАИ на каждый из тех КАИ, с которыми он образует зону двойного обзора.

Проверка разработанной модели проводилась при исходных данных, представленных в таблице.

Результаты моделирования для наглядности представлены в графическом виде. На рис. 6 представлены временные интервалы существования некоторых зон двойного обзора с участием первого КАИ. По оси абсцисс отложено время от начала моделирования, по оси ординат – номер другого КА, образующего вместе с первым зону двойного обзора.

На рис. 7 представлены параметры ориентации линии визирования с первого КАИ на другие при образовании зон двойного обзора.

Разработанная модель может быть использована при обосновании баллистической структуры и тактико-технических требований к перспективной системе ОСМКО, а также для определения конструктивного облика КАИ и программы управления бортовой аппаратурой в части ориентации БОЭП. При этом в качестве оптимизируемых параметров могут быть использованы время существования и размеры зон двойного обзора, определяемые косвенно в соответствии с уравнением (12).

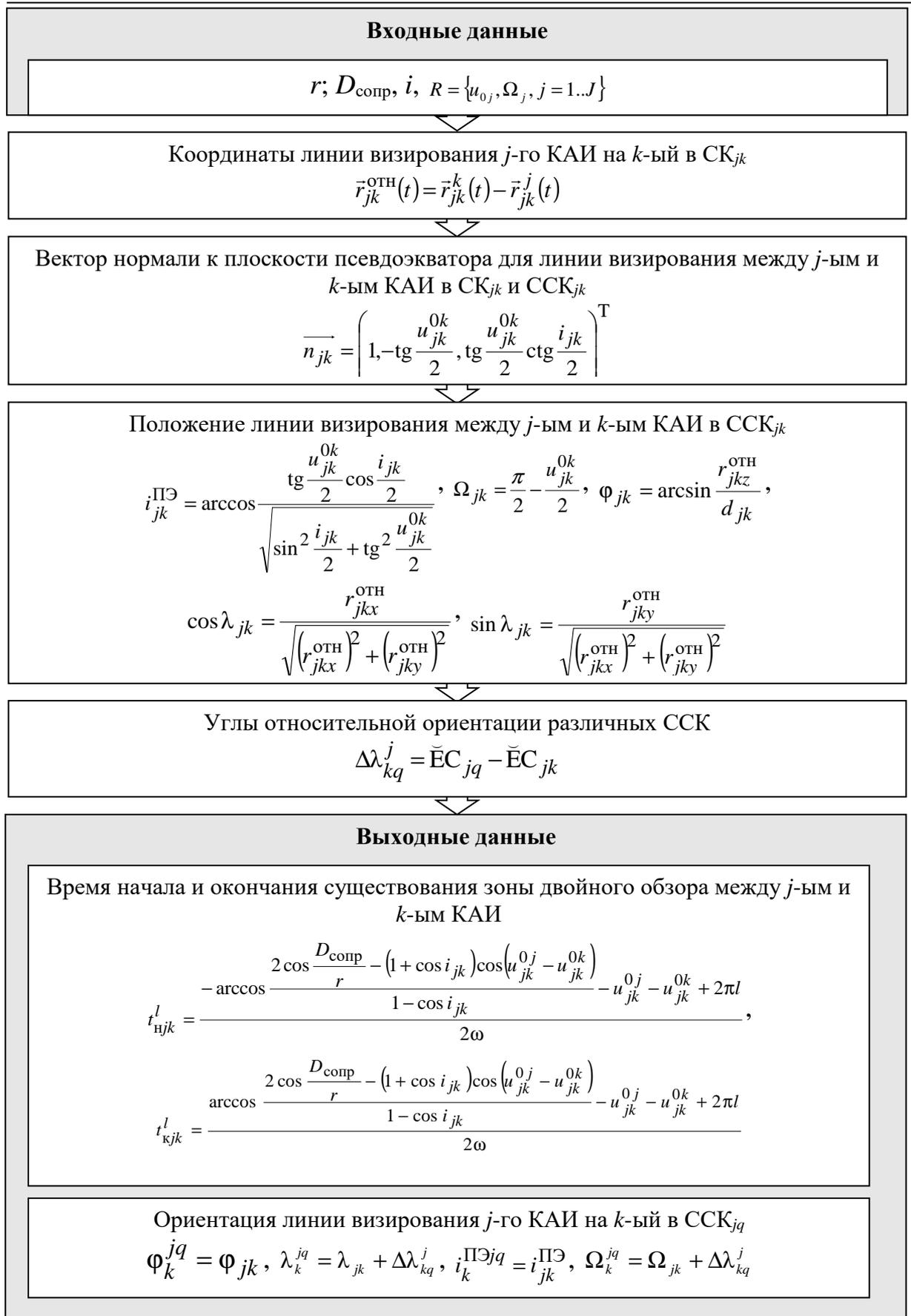


Рис. 5. Структура модели ОСМКО

Исходные данные для проведения моделирования

Наименование параметра	Значение
Радиус круговой орбиты, r , км	7021
Наклонение плоскости орбиты, i , °	99
Долготы восходящих узлов плоскостей орбит КАИ, °	
$\Omega_1 - \Omega_8$	0
$\Omega_9 - \Omega_{16}$	45
$\Omega_{17} - \Omega_{24}$	90
$\Omega_{25} - \Omega_{32}$	135
Аргумент широты КАИ в начальный момент времени, °	
u_{01}, u_{017}	0
u_{02}, u_{018}	45
u_{03}, u_{019}	90
u_{04}, u_{020}	135
u_{05}, u_{021}	180
u_{06}, u_{022}	225
u_{07}, u_{023}	270
u_{08}, u_{024}	315
u_{09}, u_{025}	22.5
u_{010}, u_{026}	67.5
u_{011}, u_{027}	112.5
u_{012}, u_{028}	157.5
u_{013}, u_{029}	202.5
u_{014}, u_{030}	247.5
u_{015}, u_{031}	292.5
u_{016}, u_{032}	337.5
Разность значений аргументов широты между КАИ из соседних орбитальных плоскостей, °	22.5
Разность долгот восходящих узлов соседних орбитальных плоскостей, °	45
Максимальная дальность обнаружения КО БОЭП, $D_{\text{сопр}}$, км	3000

Результаты моделирования для наглядности представлены в графическом виде. На рис. 6 представлены временные интервалы существования некоторых зон двойного обзора с участием первого КАИ. По оси абсцисс отложено время от начала моделирования, по оси ординат – номер другого КА, образующего вместе с первым зону двойного обзора.

На рис. 7 представлены параметры ориентации линии визирования с первого КАИ на другие при образовании зон двойного обзора.

Разработанная модель может быть использована при обосновании баллистической структуры и тактико-технических требований к перспективной системе ОСМКО, а также для определения конструктивного облика

КАИ и программы управления бортовой аппаратурой в части ориентации БОЭП. При этом в качестве оптимизируемых параметров могут быть использованы время существования и размеры зон двойного обзора, определяемые косвенно в соответствии с уравнением (12).

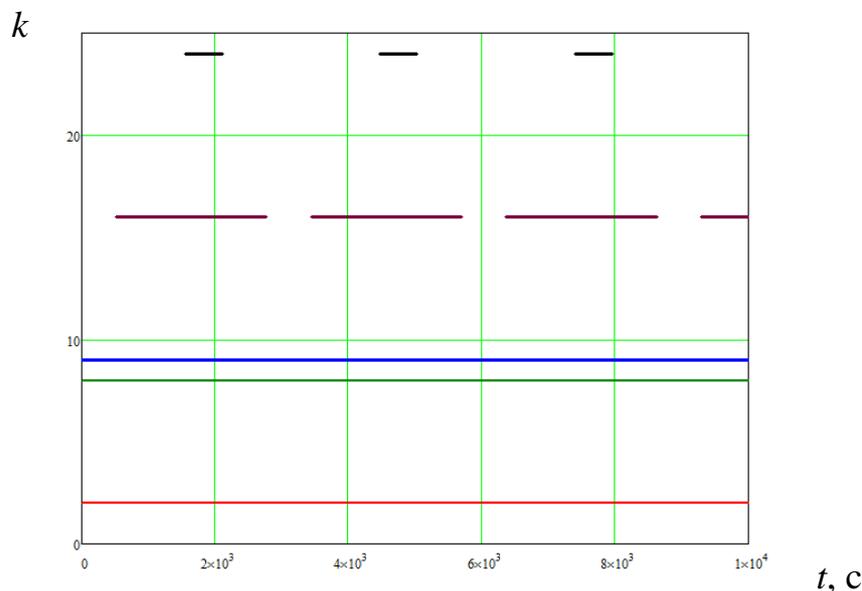


Рис. 6. Временные интервалы существования зон двойного обзора с участием первого КАИ

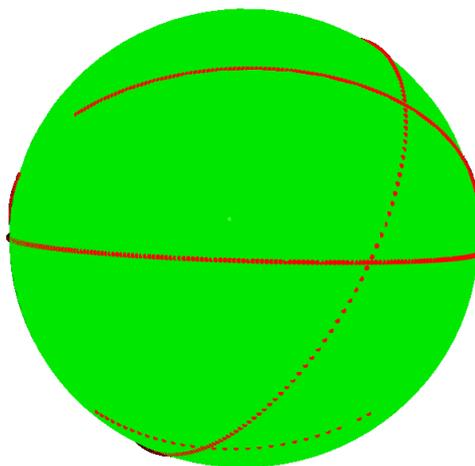


Рис. 7. Параметры ориентации линии визирования

Параметры ориентации линии визирования могут быть использованы при решении задачи обоснования количества и расположения БОЭП, а также параметров углового движения КАИ. При этом последняя задача может ставиться в виде нахождения угловой скорости вращения КАИ, при которой дуги, соответствующие угловой ориентации линии визирования (рис. 7), имеют наименьший размер.

Список литературы

1. Orbital Debris Quarterly News. NASA, Vol. 21, I. 1, Feb. 2017. P. 12.
2. СККП России: вчера, сегодня, завтра. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: www.army.lv/ru/SKKP-Rossii-vchera-segonya-zavtra./2615/2489 (дата обращения 07.02.2018).
3. United States Space Surveillance Network. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Space_Surveillance_Network (дата обращения: 07.02.2018).
4. National Aeronautics and Space Administration. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.nasa.gov/news/debris_faq.html (дата обращения: 07.02.2018).
5. Фадин И.А. Постановка задачи обоснования баллистической структуры орбитальной системы контроля космического пространства / И.А. Фадин // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. Вып. 1. С 230–239.
6. Половников В.И., Скутницкий В.М. Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции. СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2012. 175 с.
7. Половников В.И., Лобков И.А. Орбитальная система контроля космического пространства. Современные проблемы механики и её преподавание в вузе: труды Всероссийской научно-методической конференции. В 2 т. Т.2 / ред. кол.: Ю.В. Кулешов, Л.К. Горшков, В.В. Козлов и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2015. С. 163–167.
8. Койнаш Б.М. Определение положений космических объектов при наблюдениях с подвижного измерителя на фоне звездного неба: сообщ. № 129. ИПА РАН. 1999. 38 с.
9. Горбулин В.И. Оптимизация орбитального построения глобальных космических систем наблюдения. М.: МО РФ, 2001.
10. Горбулин В.И., Зозуля Л.П., Панченко В.В., Чернявский В.А. Использование орбитальных карт для разработки метода расчёта показателей качества спутниковых систем при обзоре широтных поясов Земли // Информация и космос. 2009. № 4. С. 66–73.

Фадин Илья Алексеевич, канд. техн. наук, начальник лаборатории – старший научный сотрудник, 4ilyal@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Матвеев Алексей Анатольевич, канд. воен. наук, старший научный сотрудник, sk_stif@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Гобулин Владимир Иванович, д-р. техн. наук, профессор, v-gorbulin@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

SPECIAL OPERATION MODEL OF SPACE AWARENESS ORBITAL SYSTEM

I.A. Fadin, A.A. Matveyev, V.I. Gorbulin

The model allows determining space and time parameters of double service zones of space awareness system in special case when all measuring spacecraft move circle orbit of the same radius.

Key words: space awareness, model, space triangulation dynamic method.

Fadin Ilya Alekseyevich, candidate of technical sciences, 4ilyal@gmail.com, Russia, Sankt-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Matveyev Alekhsey Anatolyevich, candidate of military sciences, sk_stif@mail.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Gorbulin Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, v-gorbulin@mail.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 621.86

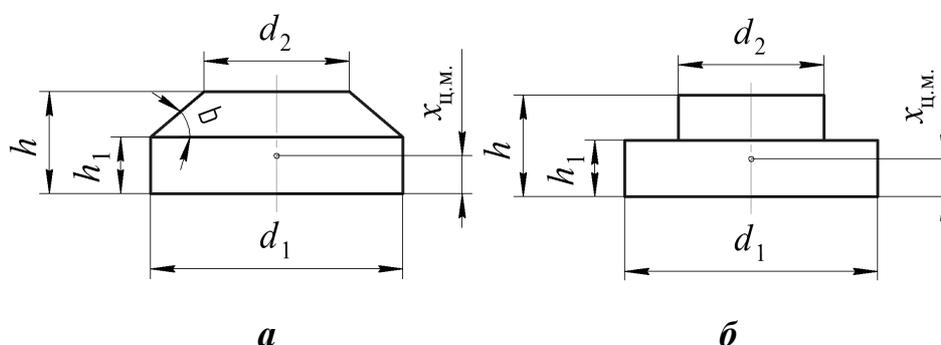
**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВЕРТИКАЛЬНОГО
БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЛОСКИХ
АСИММЕТРИЧНЫХ ПРЕДМЕТОВ ОБРАБОТКИ НА ЗАДАННУЮ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ**

В.В. Прейс, А.В. Чурочкин

Рассмотрена методика параметрического синтеза усовершенствованной конструкции вертикального бункерного загрузочного устройства для плоских асимметричных предметов обработки на заданную производительность с использованием предложенной математической модели и с учетом параметрических отказов.

Ключевые слова: параметрический синтез, вертикальное бункерное загрузочное устройство, производительность, математическая модель.

Автоматическая загрузка технологических машин и автоматических линий плоскими ($h/d_1 = 0,6...0,8$) осесимметричными предметами обработки формы тел вращения, имеющих асимметрию внешней формы, например, один из торцов – цилиндрический, а другой – конический (рис. 1, а) или цилиндрический, но меньшего диаметра (рис. 1, б), осуществляется механическими дисковыми бункерными загрузочными устройствами (БЗУ) [1].



**Рис. 1. Плоские осесимметричные предметы обработки формы тел вращения, имеющие асимметрию внешней формы:
а – с коническим торцом; б – цилиндрические**

Известное вертикальное БЗУ, содержащее бункер и вращающийся вокруг горизонтальной оси вращения диск с профильными карманами, расположенными радиально по периферии вращающегося диска, форма которых соответствует наружному очертанию загружаемых предметов обработки, обладает рядом недостатков:

- снижением производительности при подаче предметов обработки с высоким коэффициентом трения из-за возможности их заклинивания в профильных карманах вращающегося диска;

- высокую трудоемкость изготовления вращающегося диска с профильными карманами;

- не универсальность конструкции, обусловленную тем, что для предметов обработки одного размерного ряда, но различной конфигурации, требуется изготовление оригинального диска с карманами.

Авторами была предложена усовершенствованная конструкции вертикального БЗУ, лишенная указанных недостатков [2]. В отличие от известной конструкции усовершенствованная конструкция вертикального БЗУ (рис. 2) содержит бункер 3 и вращающийся вокруг горизонтальной оси вращения 1 диск 2, по периферии которого с заданным шагом на горизонтальных осях установлены с возможностью вращения профильные ролики 4. Внешние поверхности роликов образуют между собой профильные карманы 5, соответствующие наружному очертанию загружаемых предметов обработки.

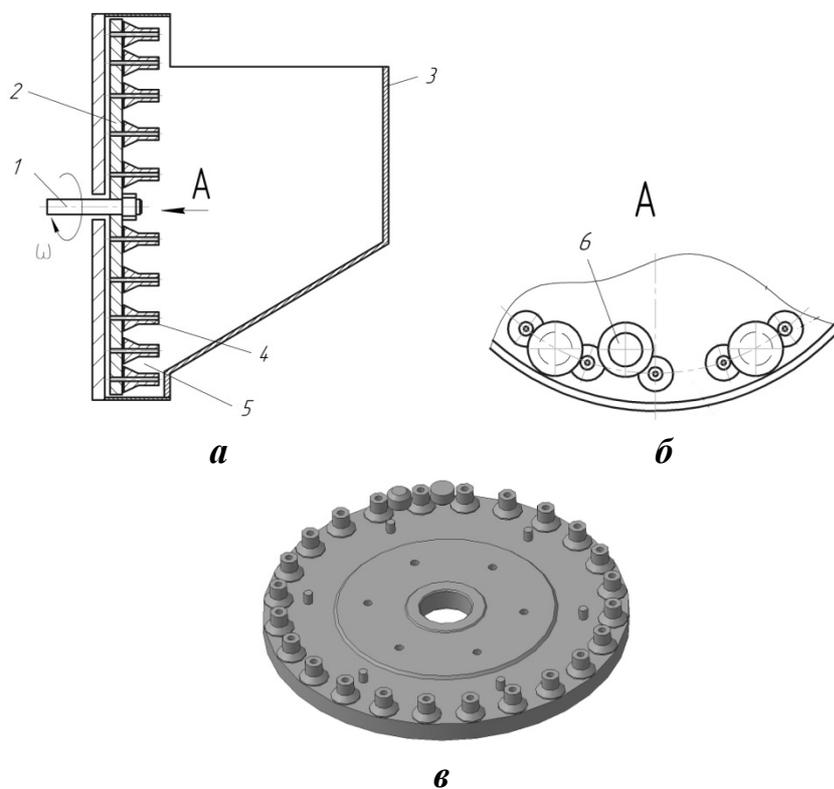


Рис. 2. Усовершенствованная конструкция вертикального бункерного загрузочного устройства: а – продольный разрез по оси вращения диска; б – фрагмент вида А на зону захвата; в – 3D-модель диска с захватывающими органами

При вращении диска 2, предметы обработки 6, засыпанные в бункер 3, движутся в сторону профильных карманов 5. Если предмет обработки 6 движется в сторону профильного кармана 5 асимметричным (коническим) торцом вперед, то он западает в профильный карман 5 полностью, поскольку внешние поверхности профильных роликов 4 соответствуют профилю предмета обработки 6. Если предмет обработки 6 движется в сторону профильного кармана 5 цилиндрическим торцом вперед, то он западает в профильный карман не полностью, так как опирается цилиндрическим торцом на нижнюю часть профильных роликов 4.

При дальнейшем вращении диска 2 предметы обработки 6, не полностью запавшие в профильные карманы 5, выпадают из них под действием силы тяжести обратно в бункер 3. Предметы обработки 6, полностью запавшие в профильные карманы 5, перемещаются вращающимся диском 2 к разгрузочному окну (на рис. 2 не показано), через которое выпадают в приемный лоток (на рис. 2 не показан).

Предложенное техническое решение позволит повысить производительность вертикального БЗУ на 20...30 % при загрузке предметов обработки с высоким коэффициентом трения, вследствие значительного уменьшения возможности их заклинивания в профильных карманах, образованных вращающимися роликами, а также расширить технические возможности вертикального БЗУ за счет его переналадки путем замены роликов с другой формой внешней поверхности.

Параметрический синтез усовершенствованной конструкции вертикального БЗУ на заданную производительность основан на предложенной авторами математической модели, представленной ниже.

Производительность механических дисковых БЗУ определяется известным выражением

$$P_{\text{БЗУ}} = \frac{60v}{t} \eta, \quad (1)$$

где v – окружная скорость захватывающих органов БЗУ, м/с; $t = d_1 + \Delta t + \delta_{\text{п}}$ – шаг захватывающих органов, м; Δt – зазор по шагу, м; $\delta_{\text{п}}$ – наименьший диаметр роликов, м; η – коэффициент выдачи БЗУ.

Зазор по шагу обеспечивает захват предметов обработки движущимся карманом. Так как в вертикальном БЗУ захват и ориентирование предметов обработки совмещены, то величина зазора ограничена условием невозможности западания в карман (между роликами) предмета обработки в не требуемом положении. Поэтому рекомендуют принимать величину зазора по шагу в диапазоне $0,05d_1 \leq \Delta t \leq 0,1d_1$.

Математическую модель производительности вертикального БЗУ для плоских осесимметричных предметов обработки будем строить на основе комплексного подхода, предложенного в работах [3-8], в соответствии с которым коэффициент выдачи БЗУ записывается в виде

$$\eta = \eta_{\max} (1 - a_{\varepsilon} v^4), \quad (2)$$

где η_{\max} – наибольшая величина коэффициента выдачи, соответствующая малой окружной скорости диска с карманами; a_{ε} – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности БЗУ.

Математическое описание наибольшей величины коэффициента выдачи БЗУ будем искать в виде произведения

$$\eta_{\max} = p_i p_c, \quad (3)$$

где $p_i = p_k p_l p_m$ – вероятность нахождения предмета обработки на пути кармана в положении, благоприятном для захвата; p_k – вероятность того, что предмет обработки окажется на поверхности вращающегося диска образующей цилиндрической поверхности; p_l – вероятность поворота предмета обработки коническим торцом или торцом меньшего диаметра к карману (положение благоприятное для захвата); p_m – вероятность отсутствия помех в осуществлении перехода предмета обработки в положение благоприятное для захвата; p_c – вероятность того, что процессу захвата не мешает взаимосцепляемость предметов обработки.

Для нахождения вероятности p_i , были рассмотрены положения, которые может занимать предметы обработки, засыпанные в бункер БЗУ

$$p_i = (p_{k_1} + (1 - p_{k_1} - p_{k_2}) p_{l_3}) p_m. \quad (4)$$

Вероятности p_{k_1} , p_{k_2} получены на основе известной методики:

$$p_{k_1} = \frac{1}{2} - \frac{x_{\text{ц.м.}}}{\sqrt{4x_{\text{ц.м.}}^2 + d_1^2}}; \quad p_{k_2} = \frac{1}{2} - \frac{h - x_{\text{ц.м.}}}{\sqrt{4(h - x_{\text{ц.м.}})^2 + d_2^2}}. \quad (5)$$

Вероятность p_{l_3}

$$p_{l_3} = \frac{1}{\pi} \left(\arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_1}{2x_{\text{ц.м.}}} \right)^2}} - \arcsin \frac{\mu}{\text{tg} \alpha_{\text{бун}}} \right), \quad (6)$$

где μ – коэффициент трения предмета обработки о направляющие поверхности бункера БЗУ; $x_{\text{ц.м.}}$ – координата центра масс предмета обработки (см. рис. 1); $\alpha_{\text{бун}}$ – угол наклона дна бункера вертикального БЗУ к горизонтали ($\alpha_{\text{бун}} > \arctg \mu$), град.

Вероятность p_m для плоских предметов обработки

$$p_m = \arcsin \left(\frac{h}{d_1} \right) / \arctg \left(\frac{d_1}{h} \right). \quad (7)$$

Вероятность p_c определим по известной зависимости

$$p_c = 1 - X, \quad (8)$$

где X – коэффициент линейного торможения $X = \sum_{i=1}^{i=z} X_i \gamma_i$, $z = n^2$ – количество

сочетаний прилегающих поверхностей предмета обработки; n – количество поверхностей, ограничивающих предмет обработки (рис. 3); γ_i – вес i -го парциального коэффициента, определяемый выражением

$$\gamma_i = \frac{F_l + F_k}{2n \sum F},$$

в котором F_l и F_k – площади прилегающих поверхностей,

$\sum F$ – площадь всех поверхностей, ограничивающих предмет обработки;

$$X_i = X_{ki} = \frac{\xi_i}{\pi} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2}$$

– парциальный коэффициент линейного торможения, в котором ξ_{xi}, ξ_{yi} – наибольшие углы поворота i -х сторон прилегающих предметов обработки без их разъединения.

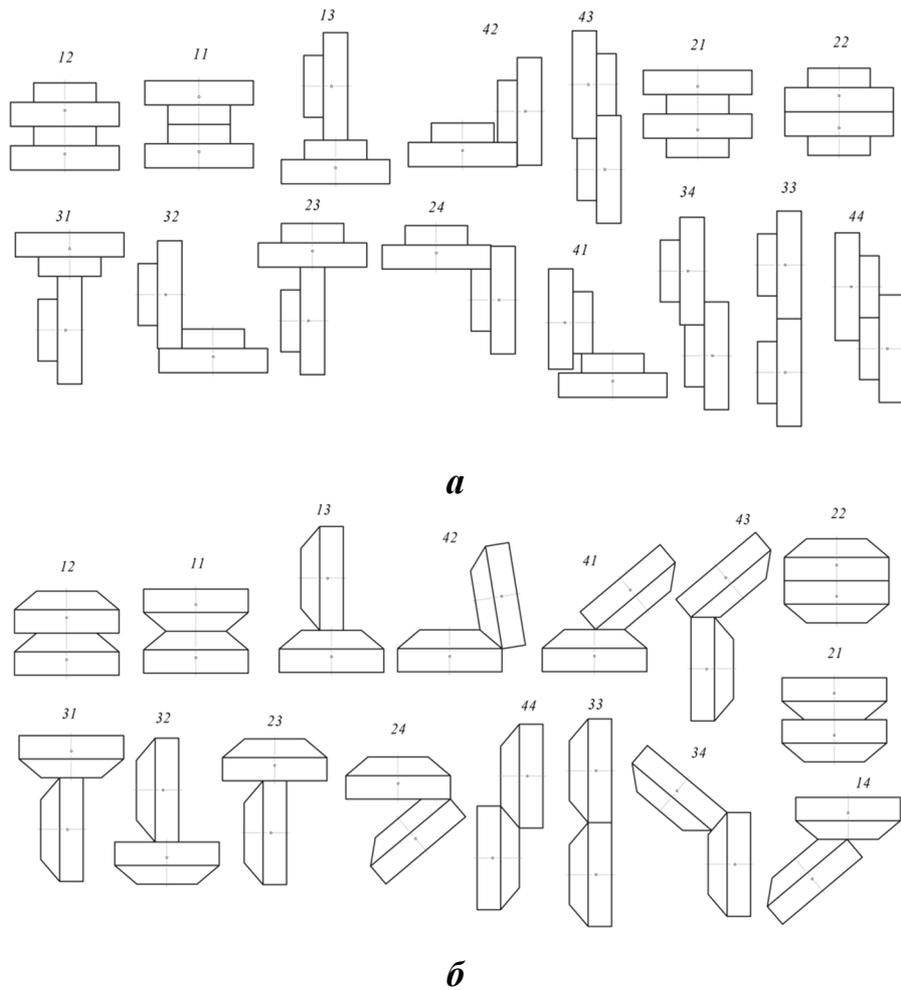


Рис. 3. Возможные сочетания прилегающих поверхностей цилиндрического предмета обработки (а) и с коническим торцом (б)

Рассмотрев все возможные сочетания прилегающих поверхностей предметов обработки, представленные на рис. 3, по формуле (8) определили вероятность p_c для каждого типа предмета обработки.

Математическое описание коэффициента ε , получаем, принимая во внимание известный факт, что при достижении некоторого предельного значения окружной скорости v_{\max} вращающегося диска с гнездами фактическая производительность БЗУ (1) падает до нуля. Тогда из выражения (2) коэффициент ε может быть определен следующим образом

$$a_\varepsilon = v_{\max}^{-4}. \quad (9)$$

Рассматривая процесс западания предмета обработки в карман, при котором произойдет неупругий удар предмета обработки о край кармана и предмет будет выброшен из кармана, получим математическое выражение, определяющее предельное значение окружной скорости диска БЗУ с захватывающими органами (профильными карманами) [8]

$$v_{\max} = \sqrt{0,2g \left[(4\Delta t + 5d_1) \pm \sqrt{(4\Delta t + 5d_1)^2 - 20(d_1 + \Delta t)^2} \right]}. \quad (10)$$

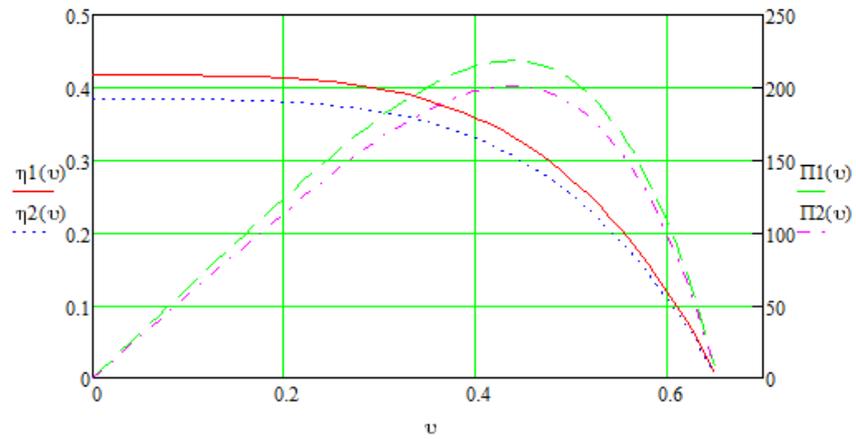
Таким образом, предложенная математическая модель производительности вертикального БЗУ для плоских асимметричных предметов обработки представлена выражениями (1) – (10).

Для численного моделирования производительности вертикального БЗУ разработанная математическая модель была реализована в стандартной программной среде *MathCad Pro*.

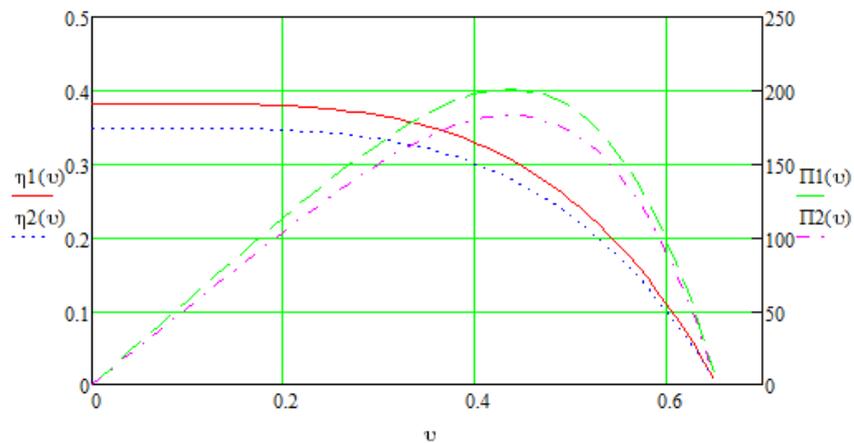
На рис. 4 представлены расчетные графики зависимости коэффициента выдачи и производительности усовершенствованной конструкции вертикального БЗУ от окружной скорости захватывающих органов для двух типов плоских асимметричных предметов обработки (см. рис. 1) с параметрами: $d_1 = 0,03$ м, $d_2 = 0,02$ м, $h = 0,02$ м, $h_1 = 0,01$ м, коэффициент трения $\mu = 0,25; 0,35; 0,4$. Принято $\alpha_{\text{бун}} = 30^\circ$, $\Delta t = 0,1d_1$.

Графики показывают, что максимальная производительность вертикального БЗУ достигается при окружной скорости захватывающих органов БЗУ 0,45 м/с и для плоских предметов обработки с коническим торцом (см. рис. 1, а) составляет 150...200 шт./мин, а для асимметричных цилиндрических предметов обработки (см. рис. 1, б) составляет 170...220 шт./мин, в зависимости от величины коэффициента трения. В работе [9] было показано, что при изменении угла наклона бункера с 30° до 45° производительность вертикального БЗУ увеличивается незначительно (< 10 %).

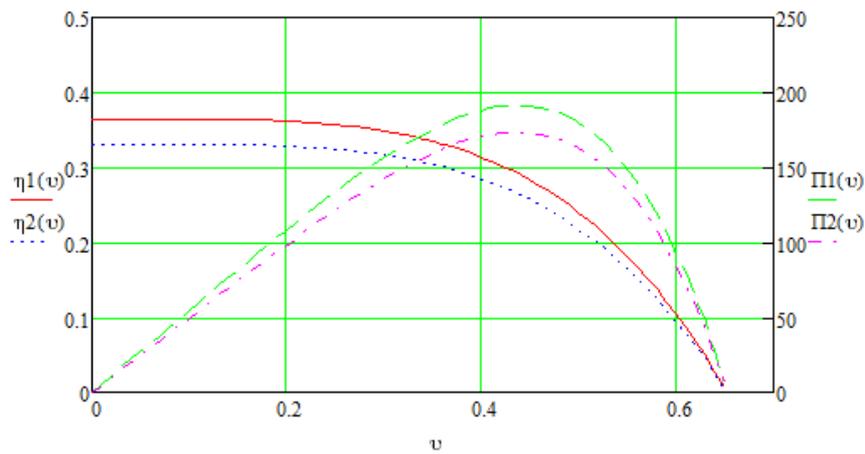
Предложенная математическая модель может быть использована для параметрического синтеза механического вертикального БЗУ на заданную производительность при загрузке в технологические машины и автоматические линии плоских асимметричных предметов обработки.



a



б



в

Рис. 4. Зависимости коэффициента выдачи и производительности БЗУ от окружной скорости захватывающих органов для плоских предметов обработки цилиндрической формы (верхние кривые) и с коническим торцом (нижние кривые) при значениях коэффициента трения: **a** – $\mu = 0,25$; **б** – $\mu = 0,35$ и ; **в** – $\mu = 0,4$

Однако предложенная математическая модель не отражает влияния на фактическую производительность БЗУ параметрических отказов, связанных с возможностью выхода длительности интервалов кинематического цикла БЗУ за расчетные значения [10].

В работе [11] было показано, что прогнозируемая величина фактической производительности механического дискового БЗУ на этапе параметрического синтеза с учетом вероятности возникновения параметрических отказов определится выражением

$$[\Pi_{\phi}]_{\text{БЗУ}} = 60 \frac{v \cdot u}{\pi D} \eta_{\max} (1 - \varepsilon v^4) \cdot (1 - q_{t_i})^{5u},$$

где $u = \frac{\pi D}{h}$ – число захватывающих органов БЗУ; D – диаметр вращающегося диска БЗУ по оси захватывающих органов; q_{t_i} – вероятность появления параметрического отказа.

Вероятность появления параметрического отказа рассчитывают по формуле

$$q_{t_i} = 0,5 - \Phi(y_i),$$

где $\Phi(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{y_i} e^{-\frac{x_i^2}{2}} dx_i$ – табулированная функция Лапласа;

$y_i = \frac{(n_t)_i - 1}{\sqrt{D(\delta t_i)}}$; $(n_t)_i$ – коэффициент запаса по времени движения предмета

обработки; $D(\delta t_i) = \frac{1}{9} \{ (n_t)_i [\bar{t}_p]_{\max} + [\bar{t}_{\text{TM}}]_{\max} \}^2$ – дисперсия случайной величины δt_i ; $[\bar{t}_p]_{\max}$; $[\bar{t}_{\text{TM}}]_{\max}$ – известные в рассматриваемых условиях максимальные разбросы относительных отклонений $[\bar{t}_p]$; $[\bar{t}_{\text{TM}}]$, которые характеризуют соответственно точность расчетов конструктивных параметров БЗУ на этапе параметрического синтеза и размах случайных колебаний фактических значений данных параметров БЗУ в процессе его эксплуатации (например, частоты вращения диска с захватывающими органами, коэффициента трения предметов обработки и т.п.).

Таким образом, на этапе параметрического синтеза вертикального БЗУ на заданную производительность обеспечение требуемой величины вероятности появления параметрического отказа возможно за счет обоснованного выбора коэффициента запаса по времени движения предметов обработки $(n_t)_i$ в рабочих интервалах технологического цикла БЗУ.

Предложенная методика параметрического синтеза усовершенствованной конструкции вертикального БЗУ на заданную производительность позволит повысить достоверность проектных расчетов.

Список литературы

1. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в технологические машины-автоматы: учебное пособие / Н.А. Усенко, В.В. Прейс, Е.В. Давыдова, Е.С. Бочарова; под ред. проф. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 310 с.
2. Патент № 170000 РФ на полезную модель. Вертикальное бункерное загрузочное устройство. МПК В 23Q 7/02 / Е.В. Давыдова, В.В. Прейс, А.В. Чурочкин. Опубл. 11.04.17. Бюл. № 11.
3. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Аналитическая модель производительности бункерного загрузочного устройства с радиальными гнездами и кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2009. № 11. С. 23-30.
4. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Аналитическая модель производительности вертикального бункерного загрузочного устройства // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2010. № 9. С. 27-31.
5. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Теоретические основы проектирования дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 7. С. 8-14.
6. Бурцев Д.В., Давыдова Е.В., Прейс В.В. Математическая модель производительности дискового бункерного загрузочного устройства с радиальными профильными гнездами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 9. С. 7-12.
7. Давыдова Е.В., Прейс В.В., Провоторова К.Н. Математическая модель производительности дискового бункерного загрузочного устройства с тангенциальными профильными гнездами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 10. С. 7-10.
8. Давыдова Е.В., Прейс В.В., Чурочкин А.В. Математическая модель производительности вертикального бункерного загрузочного устройства для плоских асимметричных предметов обработки // Прогресивні технології і системи машинобудування. 2016. № 3 (54). С. 36-40.
9. Чурочкин А.В. Компьютерное моделирование производительности вертикального дискового бункерного загрузочного устройства для плоского сплошного асимметричного предмета обработки // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. трудов XXI междунар. научно-техн. конф. АПИР-21, 10-11 ноября 2016 г. в г. Туле. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 16-21.
10. Прейс В.В. Модели и оценка надежности роторных систем автоматической загрузки с параметрическими отказами // Автоматизация и современные технологии, 2003. № 1. С. 9-15.

11. Давыдова Е.В., Дружинина А.В., Прейс В.В. Математическая модель производительности механического дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с параметрическими отказами // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2015. № 10. С. 11-15.

Преис Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, rabota-preys@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чурочкин Александр Викторович, соискатель, churochkin_88@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**PARAMETRIC SYNTHESIS OF VERTICAL HOPPER FEEDING DEVICE
FOR A PLANE ASYMMETRICAL PARTS ON A SET PRODUCTIVITY**

V.V. Preis, A.V. Churochkin

The method of parametric synthesis of the improved design of the vertical hopper feeding device for plane asymmetric parts on the set productivity with use of the offered mathematical model and taking into account parametric failures is considered.

Key words: parametric synthesis, vertical hopper feeding device, productivity, mathematical model.

Preis Vladimir Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, rabota-preys@yandex.ru, Russia, Tula, Tula state university,

Churochkin Alexander Victorovich, competitor, churochkin_88@mail.ru, Russia, Tula, Tula state university

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ НАРЕЗКИ КЮВЕТОВ СЗП-600

А.А. Шубин, А.Е. Смолвик, Г.Ю. Дедов

Рассмотрены основные варианты модернизации машины для ремонта земляного полотна СЗП-600. Произведены расчеты, подтверждающие работоспособность всех предложенных конструкций. Предложены усовершенствованные конструкции отдельных узлов машины, а именно механизма поворота стрелы, механизма поворота ротора, конструкции поворотного конвейера.

Ключевые слова: железнодорожный путь, путевые машины, машины для ремонта земляного полотна, модернизация, совершенствование конструкций, повышение конкурентоспособности.

Поддержание железнодорожного пути в рабочем состоянии является важнейшей задачей для обеспечения безаварийной работы и нормативных скоростей движения железнодорожного транспорта. Одним из главных параметров, обеспечивающих решение этой задачи, является отвод внешних и грунтовых вод от земляного полотна. Это реализуется с помощью гидротехнических сооружений и кюветов. Для нарезки и очистки кюветов на сети российских железных дорог используются различные кюветоочистительные машины КОМ-300, МКТ-1П, МКВЧ-01Р, СЗП-600. Основным рабочим органом этих машин является ротор, установленный на поворотной стреле. В настоящее время на сети железных дорог эксплуатируется большое количество машин этого типа. По данным источника [1] в 2010 году насчитывалась 91 машина для ремонта и нарезки кюветов, из всего парка более 30 % составляют машины СЗП-600.

Конструкции кюветоочистительных машин и их функциональные возможности постоянно совершенствуются. В настоящее время разработана и успешно эксплуатируется для очистки и нарезки кюветов машина СЗП-750, в конструкцию которой с учетом опыта эксплуатации машин СЗП-600 внесены изменения.

Срок службы кюветоочистительных машин составляет не менее 30 лет, поэтому актуальной является задача модернизации эксплуатируемых на сети дорог машин с целью повышения их функциональных возможностей.

Анализ опыта эксплуатации кюветоочистительных машин СЗП-600 позволяет сформулировать следующие направления модернизации отдельных ее узлов:

- совершенствование механизма поворота стрелы,
- совершенствование конструкции механизма поворота ротора,
- совершенствование конструкции поворотного конвейера.

Поворот портала со стрелой на машине СЗП-600, осуществляется с помощью двух гидроцилиндров и соединенного с ними каната, который огибает опорно-поворотное устройство (ОПУ) портала и с помощью болтов прикреплен к нему. Недостаточная жесткость каната, приводит к колебаниям стрелы при повороте портала, а также недостаточной жесткости системы при работе ротора, что увеличивает динамические нагрузки на узлы машины [2]. В машинах СЗП-750 и МКВЧ-01Р поворот портала осуществляется с помощью двух гидроцилиндров, соединенных с ОПУ. Данная схема может быть реализована на машине СЗП-600 при ее модернизации, с незначительными конструктивными доработками, заключающимися в использовании двух кронштейнов, привариваемых к опорно-поворотному устройству (рис.1) с соответствующим переносом узлов крепления гидроцилиндров к раме машины. Момент, необходимый для поворота портала, с учетом того, что в начале поворота один гидроцилиндр будет совершать толкающее усилие, а второй – тянущее, составляет 172,3 кН·м. После прохождения вторым гидроцилиндром «мертвой точки» они оба будут совершать толкающее усилие.

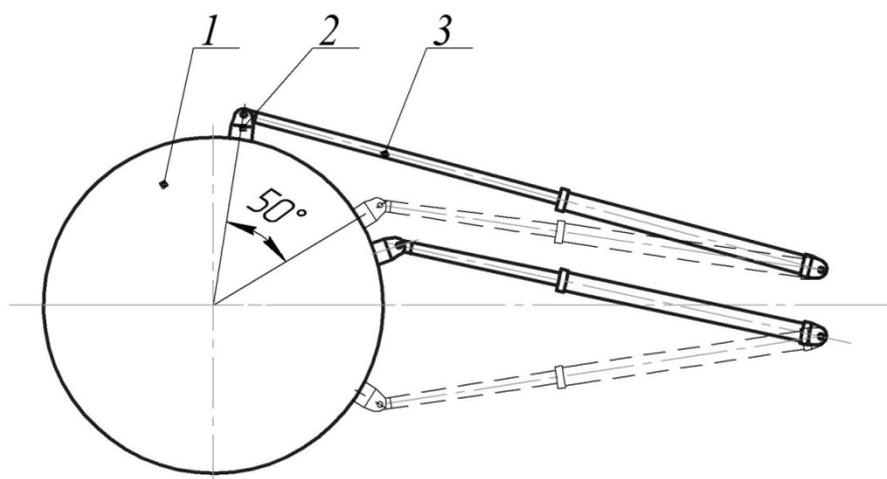


Рис. 1. Предлагаемая схема механизма поворота (пунктирной линией показано положение механизма в начальный момент поворота): 1 – опорно-поворотное устройство; 2 – кронштейн; 3 – гидроцилиндр

Предлагаемое изменение в конструкции может быть реализовано силами предприятий, эксплуатирующих данные машины. Для этого к ОПУ необходимо приварить два кронштейна для присоединения штока гидроцилиндра, а также перенести место крепления гидроцилиндра к раме.

При использовании установленных на машине гидроцилиндров НВ 110/70/2500 для определения места крепления кронштейнов к ОПУ и их размеров была составлена расчетная схема с учетом того, что для приведения ротора в рабочее положение необходим поворот стрелы на 50° относительно продольной оси машины, при этом шток гидроцилиндра не должен касаться ОПУ (рис.2).

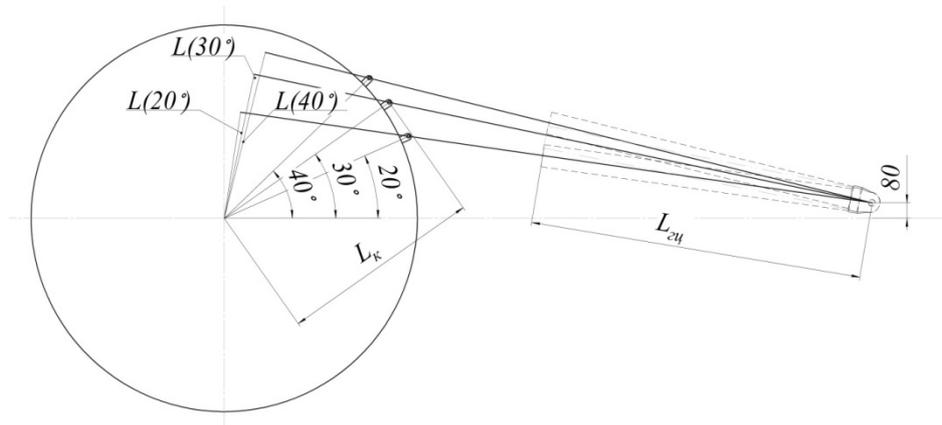


Рис.2. Расчетная схема для определения плеча действия силы в зависимости от угла установки кронштейна:

L_k – расстояние от центра опорно-поворотного устройства до места крепления штока гидроцилиндра; $L_{гц}$ – длина гидроцилиндра

Были произведены расчеты для нескольких вариантов размеров кронштейнов и мест их установки. Оптимальным, с точки зрения величины усилий необходимых для поворота ОПУ и обеспечения условия поворота на заданный угол, можно считать кронштейн размером 160 мм, установленный на угле 40°. В соответствии с расчетной схемой кронштейн крепления гидроцилиндра к раме необходимо перенести на 2410 мм ближе к ОПУ и сместить на 80 мм от продольной оси. Результаты расчетов показали, что применение гидроцилиндра с ходом штока 2500 мм не совсем целесообразно в связи с тем, что в начале поворота для создания момента необходимо на штоке реализовать значительное усилие.

С использованием расчетной схемы (рис.2) были рассмотрены варианты замены существующего гидроцилиндра на гидроцилиндры с меньшим ходом штока, выбранных с помощью источника [3]. Расчеты показали, что целесообразно использовать гидроцилиндры ЦГ 125,60x900,11 мм с диаметром поршня 125 мм, ходом поршня 900 мм и рабочим давлением 16 МПа и кронштейн величиной 50 мм при угле установки 20°. В этом случае узел крепления к раме машины находится на расстоянии 3200 мм от центра ОПУ и смещен на 80 мм в сторону.

Еще одним механизмом, в котором используются канаты, является механизм поворота ротора относительно стрелы. Он содержит два гидроцилиндра (рис.3), установленных на верхней полке металлоконструкции стрелы. Каждый гидроцилиндр связан с ускоряющим полиспастом, содержащим блок, установленный в направляющих. Канат полиспастов прикреплен через коуши к стреле и к нему через коуши прикреплен ротор[4]. Поворот ротора относительно стрелы осуществляется при встречном движении гидроцилиндров. В этом случае необходимо использовать канат длиной 14 м, что, как было сказано ранее, не обеспечивает требуемой жесткости системы и увеличивает динамические нагрузки на узлы стрелы и портала во время работы.

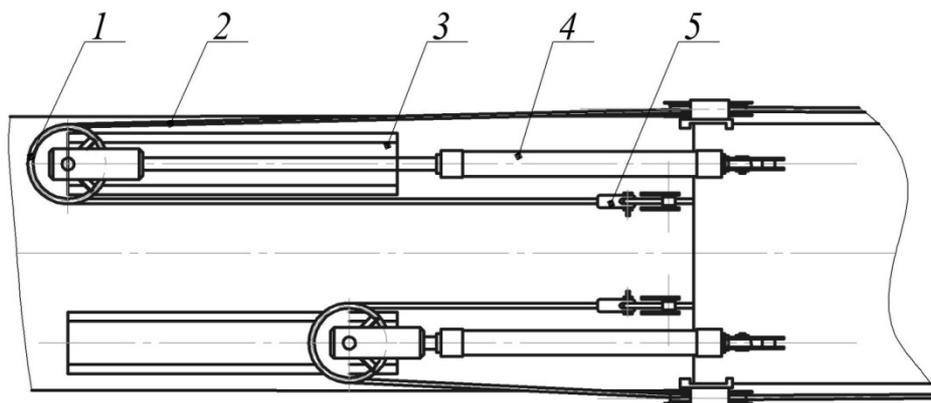


Рис. 3. Используемый механизм поворота ротора:
1 – блок подвижный; 2 – канат; 3 – опора с направляющей;
4 – гидроцилиндр поворота ротора; 5 – коуш

Предлагается разместить гидроцилиндры поворота ротора на специальных платформах, прикрепляемых к боковой поверхности стрелы (рис.4), переместив весь механизм ближе к ротору. Это позволит при использовании тех же гидроцилиндров и блоков уменьшить длину каната на 5,5 м (или на 40 %).

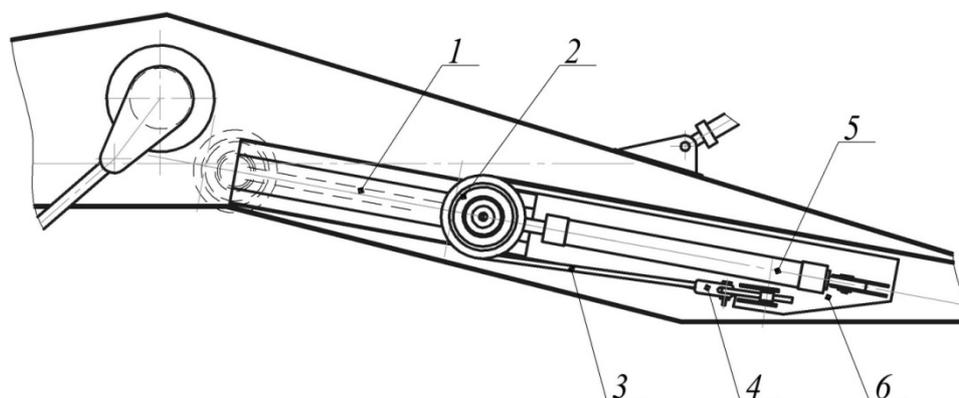
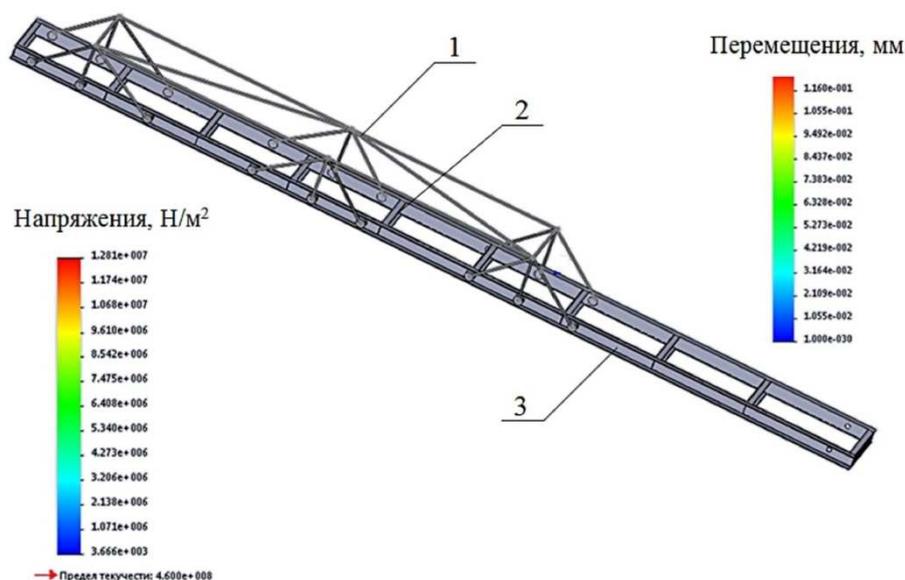


Рис. 4. Предлагаемый механизм поворота ротора:
1 – опора с направляющей; 2 – блок подвижный; 3 – канат;
4 – коуш; 5 – гидроцилиндр поворота ротора; 6 – специальная платформа

В существующей машине несущей рамой поворотного конвейера является его каркас коробчатого сечения [5], на котором установлены роликоопоры, а на концах два барабана: приводной и оборотный. Длина поворотного конвейера составляет 8,2 м. Увеличение длины конвейера позволит не только производить разгрузку вырезанного материала в подвижной состав, но и увеличить дальность выгрузки от оси железнодорожного пути.

Предлагается установить на машину СЗП-600 конвейер аналогичный СЗП-750, длиной 10,5 м (рис.5), в котором рама конвейера состоит из двух параллельных швеллеров, соединенных между собой поясами.

Это позволяет облегчить конструкцию и одновременно увеличить длину рамы. При увеличении длины, на консольной части рамы увеличивается изгибающий момент, который предлагается компенсировать с помощью дополнительной фермы, прикрепленной к раме сверху и состоящий из труб. Ферма позволяет повысить жесткость рамы и равномерно распределить нагрузку от гидроцилиндра, обеспечивающего изменение угла наклона конвейера. Узлы крепления конвейера аналогичны существующим на машине СЗП-600.



**Рис. 5. Предлагаемая конструкция рамы поворотного конвейера:
1 – ферма; 2 – пояс; 3 – швеллер**

Проведенные с использованием программного обеспечения SolidWorks и методики [6, 7] прочностные расчеты показали, что при использовании швеллеров 18П и дополнительной фермы, выполненной из труб 35x3 сталь 3, напряжения и перемещения в раме не превышают допустимые. Реализация новой конструкции рамы позволяет не только увеличить ее длину на 2,3 м, но и снизить массу на 367 кг(рис.5).

Большой срок службы СЗП-600 (до 30 лет) предопределяет необходимость модернизации и совершенствование ее конструкции в процессе эксплуатации, с целью повышения ее функциональных возможностей и конкурентоспособности. В данной работе предложены некоторые пути совершенствования конструкции отдельных узлов кюветоочистительной машины СЗП-600, заключающиеся в следующем:

- заменить канат гидроцилиндрами, установленными под углом к продольной оси, в механизме поворота стрелы ротора,

- уменьшить длину каната механизма поворота ротора за счет изменения места его установки,
- изменить конструкцию рамы поворотного конвейера, что позволит увеличить ее длину и уменьшить массу конвейера.

Список литературы

1. Газета «Гудок» [Электронный ресурс] URL: <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=700356> (дата обращения: 16.02.2018).
2. Дедов Г.Ю., Шубин А.А. Модернизация механизма поворота стрелы кюветоочистительной машины СЗП-600. Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 18–20 апреля 2017 г. Т. 3. Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С.57-59.
3. Гидрокомплект [Электронный ресурс] URL: http://gik43.ru/product_74390.html (дата обращения: 21.02.2018).
4. Путевые машины: учебник / М.В. Попович [и др.]. Электрон. текстовые данные. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. 820 с.
5. Путевые машины: учебник для вузов ж.-д. транс./ С.А. Соломонов, М.В. Попович, В.М. Бугаенко и др. Под ред. С.А. Соломонова. М.: Желдориздат, 2000. 756 с.
6. Анцев В.Ю., Толоконников А.С., Калабин П.Ю. Оптимизация металлических конструкций грузоподъемных машин мостового типа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. Вып. 4. С. 18-22.
7. Анцев В.Ю., Толоконников А.С., Калабин П.Ю. Повышение технологичности металлоконструкций пролетных балок мостовых кранов // Тяжелое машиностроение. 2013. № 8. С. 10-14.

Шубин Александр Анатольевич, канд. техн. наук, зав. кафедрой, shubin55@mail.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет),

Смоловик Андрей Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, smolovik.andrey@sogaz.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет),

Дедов Григорий Юрьевич, студент, dedov.gr@yandex.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

IMPROVING THE DESIGN OF VIBRATION DAMPING ELEMENT STAMPER

A.A. Shubin, A.E. Smolovik, G.Y. Dedov

Examined the main shortcomings of machine for repair of the subgrade SZP 600. Designs on improvement of separate units of the machine, namely the mechanism of rotation of an arrow, the mechanism of rotation of the rotor, a design of the rotary conveyor are offered. The calculations confirming the performance of the proposed designs.

Key words: railway track, track machines, machines for repair of the subgrade, modernization, improving the design, improving the competitiveness.

Shubin Alexandr Anatolievich, candidate of technical sciences, head of department, shubin55@mail.ru, Russia, Kaluga, Kaluga Branch of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman (National Research University),

Smolovik Andrey Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, smolovik.andrey@sogaz.ru, Russia, Kaluga, Kaluga Branch of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman (National Research University),

Dedov Grigory Yuryevich, student, dedov.gr@yandex.ru, Russia, Kaluga, Kaluga Branch of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman (National Research University)

ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ

УДК 620.197

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННЫХ ОБРАЗЦОВ СПВ, И СПОСОБЫ ИХ ЗАЩИТЫ

Д.О. Селифонов

Рассмотрена номенклатура современных образцов стрелково-пушечного вооружения, которая в себя включает автоматическое стрелковое оружие и малокалиберное артиллерийское вооружение. Она же и является объектом исследования стойкости материалов вооружения к микробиологическим и коррозионным повреждениям. Проведен анализ состава материалов, используемых для изготовления изделий СПВ, и представлены способы их защиты от коррозии и биоповреждений.

Ключевые слова: стрелково-пушечное вооружение, материал, покрытие, смазочный материал, коррозия, биоповреждение.

Вооруженные силы Российской Федерации (ВС РФ) имеют на вооружении достаточное количество образцов и комплексов вооружения, в том числе современное стрелково-пушечное вооружение (СПВ), которое играет важную роль в достижении поставленных целей и задач.

Значительную часть номенклатуры СПВ составляет автоматическое стрелковое вооружение (СВ), которое является основным оружием личного состава (рис. 1).



Рис. 1. Номенклатура современных образцов СПВ

Пистолет Макарова (ПМ) находится на вооружении с 1951 г. в некоторых странах бывшего Варшавского Договора, Китае и др. Пистолет разработан под патрон калибра 9x18 мм ПМ. Предназначен для ведения огня в ближнем бою и является личным оружием офицерского состава вооруженных сил и сотрудников силовых структур государства [1]. Пистолет Макарова является самым массовым изделием среди пистолетов в РФ.

В настоящее время ввиду морального устаревания ПМ, ему на замену в 2003 году был принят на вооружение пистолет Ярыгина «Грач» (ПЯ), разработанный под патрон калибра 9x19 мм Парабеллум.

По состоянию на начало 2010 года, пистолеты Ярыгина начали поступать на вооружение подразделений ВС России, внутренних войск, специальных подразделений МВД РФ и иных силовых структур.

В 2011 году был налажен массовый выпуск ПЯ для армии РФ. В 2012 году пистолет Ярыгина как новое штатное оружие начали осваивать офицеры Западного ВО [1].

Самым массовым изделием среди всех образцов автоматического стрелкового вооружения является автомат Калашникова (АК). С 1947 года, с момента принятия его на вооружение, выпущено уже более 55 млн. единиц АК различных модификаций [1] (для сравнения: американских автоматических винтовок М16 различных модификаций - около 8 млн. единиц).

Конструкция автомата позволила провести на ее основе унификацию всего автоматического стрелкового оружия, то есть вместо нескольких его видов, включая ручной пулемет, ввести один с отдельными вариациями:

- 7,62-мм АК образца 1947 г. с деревянным прикладом и АКС со складным металлическим прикладом;
- 7,62-мм АКМ (1959 г.) - автомат Калашникова модернизированный с деревянным прикладом и АКМС со складным металлическим прикладом;
- 5,45-мм автомат Калашникова АК-74 с постоянным прикладом;
- 5,45-мм автомат Калашникова со складывающимся прикладом АКС-74;
- 5,45-мм автомат Калашникова с ночным прицелом АК-74Н;
- 5,45-мм автомат Калашникова со складывающимся прикладом с ночным прицелом АКС-74Н.

В 1991 г. начат серийный выпуск 5,45-мм автомата Калашникова АК-74М со складывающимся пластмассовым прикладом, имеющего стандартный узел укрепления (планку) для оптических и ночных прицелов. В последние годы разработаны и подготовлены к серийному выпуску модернизированные автоматы: 7,62-мм АК-103 и АК-104; 5,45-мм АК-105 и другие модификации [1].

Разработка нового АК была начата в 2011 году заводом ИЖМАШ (ныне входит в концерн «Калашников») в инициативном порядке, для участия в конкурсе «Ратник». За прошедшее время конструкция автомата неоднократно пересматривалась на основе результатов очередных этапов испытаний.

Автомат АК-12 в калибрах 5,45-мм и 7,62-мм проходил государственные испытания в 2015 году, получив ряд рекомендаций от комиссии. Главным образом рекомендации сводились к доработке автоматов на технологичность изготовления.

В ходе разработки 7,62-мм вариант автомата получил наименование АК-15.

Самые новые варианты автоматов АК-12 и АК-15 весной 2016 года успешно прошли государственные испытания и были направлены на войсковые испытания в подразделения Российской армии, проводившиеся в разных климатических зонах и родах войск, которые завершились в 2017 году. Результатом этих испытаний и стала информация о том, что автоматы АК-12 и АК-15 официально одобрены Министерством Обороны России и рекомендованы для вооружения подразделений Вооруженных сил России [2].

Ручные пулеметы Калашникова РПК-74 и РПКС-74 незначительно отличаются от автомата АК-74 наличием удлиненного ствола, подвижного целика прицельной планки, сошек и магазина емкостью 45 патронов. Конструкционные материалы, применяемые для их изготовления те же, что и для автомата Калашникова. 7,62-мм пулеметы Калашникова (ПК, ПКС – на станке, ПКТ - танковый) являются однотипными с автоматами и ручными пулеметами Калашникова образцами вооружения.

7,62-мм пулемёт ПКП «Печенег» - российский единый пулемёт, разработанный на основе пулемёта Калашникова. Предназначен для поражения живой силы противника, огневых и транспортных средств, воздушных целей. Разработан ЦНИИточмаш. Пулемет был принят на вооружение в 2001 году.

За основу конструкции взят 7,62-мм пулемёт Калашникова. Это позволило с минимальными затратами развернуть производство в 1999 г., а также упростить его эксплуатацию. Ствольная группа обеспечивает отстрел не менее 600 патронов длинными очередями без ухудшения эффективности стрельбы. При ведении длительного боя пулемёт может выстреливать до 10 000 патронов в час без ухудшения боевых характеристик и уменьшения ресурса ствола. В целом, Печенег сохранил до 80 % общих деталей с ПКМ (ствольная коробка со всеми механизмами, станок).

Печенег может использовать всю номенклатуру винтовочных патронов 7,62×54 мм R [1].

Другой значительной составляющей номенклатуры СПВ является унифицированная система малокалиберного артиллерийского вооружения (МАН) – малокалиберных пушек на базе единого патрона калибра 30-мм, которые обеспечивают потребности всех родов войск в этом виде оружия.

В настоящее время почти все вооружение подобного класса разработано в АО «КБП» под руководством А.Г. Шипунова и В.П. Грязева на основе системного подхода, главная особенность которого состоит в переходе от разработки отдельных образцов малокалиберных пушек к созданию унифицированной системы артиллерийского вооружения всех родов войск. Это обеспечивает минимальную номенклатуру боеприпасов и пушек, широкую их унификацию и, как следствие, наименьшие сроки и стоимость разработки и производства вооружения [3, 4].

Структура современной отечественной системы малокалиберных пушек представлена на рис. 2.

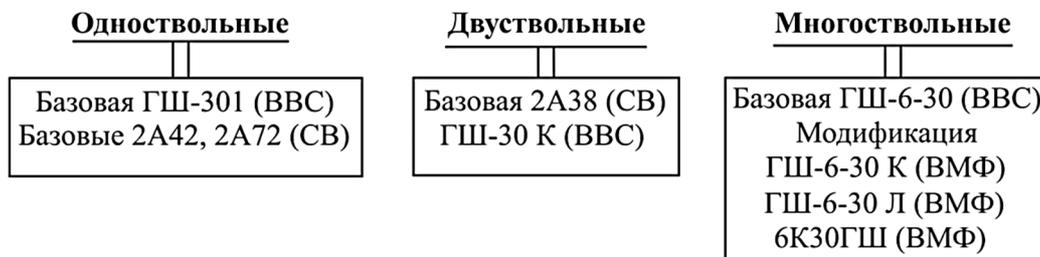


Рис. 2. Современная структура отечественной системы малокалиберных пушек

В ее состав входят принятые на вооружение, в том числе для Сухопутных войск:

- 30-мм однствольная автоматическая пушка 2А42, предназначенная для борьбы с легкобронированными целями на дальности до 1500 м, установками ПТУРС, небронированными средствами и живой силой противника на расстоянии до 4000 м. Пушка монтируется на боевые машины БМП-2, БМД-2, БМД-3, БТР-90, БМПТ, на вертолеты Ка-50, Ка-52, МИ-28Н, речные бронекатера проекта 58150 «Гюрза»;

- 30-мм однствольная автоматическая пушка 2А72, предназначенная для подавления или поражения танкоопасной живой силы на дальностях до 1500 м, поражения легкобронированных целей на дальности до 2000 м. Пушка монтируется на боевые машины БМП-3, БМД-4, БМД-4М, БТР-3, БТР-80А, БТР-82А, БТР-90М, БРМ-3К, Уран 9, одиночный боевой модуль "Кливер";

- 30-мм модернизированный двухствольный зенитный автомат 2А38М, предназначенный для борьбы с воздушными целями на малых высотах (от 200 до 2000 м). Устанавливается на зенитную самоходную установку ЗСУ 2С6М "Тунгуска-М1", зенитный ракетно-пушечный комплекс "Панцирь-С1" и его модификации;

- для авиации: 30-мм одноствольную пушку ГШ-301 (МиГ-29, МиГ-35, Су-27, Су-30, Су-33, Су-27М, Су-37, Су-35, Су-47, ПАК ФА), фронтовых бомбардировщиков Су-34, самолётов вертикального взлёта и посадки Як-141); 30-мм двуствольную пушку ГШ-2-30 (для самолетов Су-25 и Су-39, а также вертолётов Ми-24П); 30-мм шестиствольную пушку ГШ-6-30 (для самолетов Су-24МК и МиГ-27);

- для Военно-Морского флота: 30-мм шестиствольный зенитный автомат ГШ-6-30 К для установки АК-630; 30-мм шестиствольный зенитный автомат ГШ-6-30 Л для установки АК-306 (система "Вихрь-К"); 30-мм шестиствольный зенитный автомат 6К30ГШ для комплекса "Каштан".

С разработкой современной системы малокалиберного артиллерийского вооружения была в основном удовлетворена потребность всех родов войск в данном виде вооружения. Но, постоянное совершенствование тактики боевого применения пушек, конкуренция со стороны управляемого вооружения выдвигает новые требования по совершенствованию конструкции и защиты материалов существующего вооружения [3-5, 12-16].

При изготовлении современных образцов СПВ используется большое количество как металлических, так и неметаллических материалов. Так, например, в автоматах и пулеметах Калашникова используется 15 марок сталей, причем 75% металлических деталей и сборочных единиц сделаны из углеродистых (содержащих 0,12-0,60 % углерода) сталей, а остальные - из низколегированных, содержащих 1,5-2,0 % хрома, до 4 % никеля, до 1,5 % марганца, кремния, бора. Неметаллические материалы применяются, главным образом, для изготовления приклада, цевья, рукояток, магазинов, штык-ножей, прицелов, корпусов аккумуляторных батарей, ремней, подсумков, чехлов, укупорки.

Для производства ответственных деталей и узлов образцов СПВ (затворные рамы, затворы, стволы, затыльники и т.п.) применяются материалы способные выдерживать высокие скорости передвижения, при этом элементы конструкций под воздействием больших давлений и ударно-вибрационных нагрузок испытывают механические напряжения [6]. Своими физико-механическими свойствами они обеспечивают выполнение деталями функциональных задач под воздействием рабочих нагрузок в течение достаточно большого количества циклов нагружений. Основными из них являются [7-9]: хромистые стали (40Х, 30ХРА) – 19-30 % деталей; хромоникельмолибденованадиевые высококачественные и особовысококачественные стали (30ХН2МФА, 35ХН2МФА-Ш) – 16-20 % деталей; хромокремнемарганцевые высококачественные стали (30ХГСА) – 13-15 % деталей.

Характеристики некоторых из этих сталей приведены в табл. 1 [10].

Для защиты конструкционных материалов образцов СПВ от процессов коррозии, старения и биоповреждений применяются защитные покрытия - химическое фосфатирование (хим. фос.) и ускоренное хроми-

рование с последующей пропиткой клеем БФ-4 (ГОСТ 12172-74) с нигрозином марки А (ГОСТ 9307-78) или допускается покрытие хим. фосф. ускоренное хр. / эмаль ВМА-5194Э черная (ТУ 6-10-21903-83), также применяются хромовое и кадмиевое покрытия. На изделия 2А38 для обработки отдельных деталей вместо клея БФ-4 и нигрозина используется суспензия ВНИИНП-212.

Таблица 1

Характеристики марок сталей используемых для производства ответственных деталей и узлов образцов СПВ

№ п/п	Марка стали	Твёрдость НВ не более		$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{\text{т}}$	g, %	Ψ , %	Ударная вязкость		Твёрдость HRC
		МПа	кгс/мм ²					МПа не менее		
1	30ХН2МФА	2639	269	883	784	10	40	883	9	41–51
2	35ХН2МФА-Ш	2639	269	1062	947	9	38	719	7,5	48–53
3	30ХРА	2360	241	1569	1275	9	40	490	5	43–47

СПВ консервируется двумя методами: индивидуальной и общей упаковки.

В случае общей упаковки каждый образец СПВ или его части укладываются в штатные упорядоченные ящики, предварительно облицованные изнутри двумя слоями парафинированной бумаги БП-3-35 (ГОСТ 9569-79) и слоем противокоррозионной бумаги УНИ-22-80 или УНИ-35-80 (ГОСТ 16295-82). В случае консервации образца СПВ, содержащего большое количество деталей из цветных металлов и их сплавов используется противокоррозионная бумага МБГИ-8-40 (ГОСТ 16295-82).

Металлические части образцов СВ смазываются жидкой ружейной смазкой РЖ (ГОСТ 9811-61), на места соприкосновения деревянных деталей с металлическими наносится смазка ПВК (ГОСТ 19537-74).

Образцы МАВ, как правило, консервируются методом индивидуальной упаковки. При этом каждый образец или его части (запасные стволы, ленты и т.д.) обертываются в один слой противокоррозионной бумаги МБГИ-8-40 и один слой полиэтиленовой пленки (ГОСТ 10354-82) и укладывается в укупорочный ящик.

Образцы МАВ при консервации смазываются пластичной смазкой ГОИ-54П (ГОСТ 3276-74), допускается использование смазок МС-70 (ГОСТ 9762-76) и Лита (ОСТ 3801295-83), характеристики которых приведены в табл. 2 [11].

Изделия из брезента и кожи при использовании любого метода консервации заворачиваются в два слоя парафинированной бумаги БП-3-35.

Законсервированные таким способом СПВ хранятся в штатной упаковке в неоттапливаемых хранилищах.

Таблица 2

Основные характеристики смазок, используемых для защиты МАВ

/п	Марка смазки	Вязкость (Па·с) при температуре			Испаряемость за 1 час (%) при температуре		Смываемость водой при 40°С за 6 час, %	Температура каплепадения °С, не ниже	Примерный диапазон температур применения, °С
		минус 30°С	0 °С	20 °С	100 °С	150 °С			
1	Лита	400–1000	350	65 (50 °С)	1	11,3	4,7	170	–50...+100
2	ГОИ-54п	до 1100	70–110	30–60	до 15 (10-12)	40-50	10-20	60 (60–70)	–50...+50
3	МС-70	300–800	100–230	90–150	8–10	40-50	16-18	80 (85–105)	–50...+65

Гарантийный срок хранения образцов СВ в неотапливаемом хранилище составляет 10 лет (ГОСТ В26039-83).

Срок гарантийного хранения для образцов МАВ [14–16]: при хранении в штатной укупорке в неотапливаемых хранилищах 10 лет; при хранении в составе носителя на открытой площадке – 10-12 лет; при хранении и эксплуатации в составе носителя в неотапливаемом хранилище – 10,5 лет, в том числе 3 года в полевых условиях и 0,5 года на заводе изготовителе.

Следовательно, состав конструкционных материалов, используемых при изготовлении современных образцов СПВ, достаточно многообразен. Своими физико-механическими свойствами конструкционные материалы должны обеспечить выполнение деталями функциональных задач под воздействием рабочих нагрузок в течение достаточно большого количества циклов нагружений, а защитные покрытия должны обеспечивать их защиту от микробиологических и коррозионных повреждений.

Список литературы

1. Шунков В.Н. Боевое и служебное оружие России. М.: Эксмо, 2012. 520 с.
2. Максим Попенкер Автоматы АК-12 и АК-15 [Электронный ресурс] URL: https://pikabu.ru/story/avtomaty_i_ak15_5681464. (дата обращения: 10.06.2018).
3. Грязев В.П. Перспективы развития и совершенствования отечественного малокалиберного артиллерийского вооружения // Оборонная техника. Инв. 16097. 1997. № 3–4. С. 23.
4. Шипунов А.Г. Высокоточное оружие для всех родов войск // Деловая Тула. 2001. № 1. С. 16–23.
5. Усов В.С. Артиллерия для армии и флота // Деловая Тула. 2001. № 1. С. 24–25.
6. Крюков В.И. Методика прогнозирования ресурса узлов трения автоматики стрелково-пушечного вооружения. Тула: ТВАИУ, 1997. 229 с.

7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 30-мм 2А42. ч. 1, 2.
8. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 30-мм 2А72. ч. 1, 2.
9. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 30-мм 2А38. ч. 1, 2.
10. Рахштадт А.Г., Брострема В.А. Справочник металлиста. В 5 т. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1976. 720 с.
11. ГОСТ В 18241-85. Масла, смазки, специальные жидкости для военной техники. Ограничительный перечень и порядок назначения. М.: Издательство стандартов, 1985. – 100 с.
12. Стариков Н.Е., Виноградов С.Н. Результаты комплексных исследований воздействия процессов коррозии и биоповреждений на материалы вооружения // «Оборонная техника». № 1-2. М.: Изд-во ФГУП «НТЦ «Информтехника», 2013. С. 57-65.
13. Стариков Н.Е., Абрамов Н.А., Кузнецов С.В., Копытов А.Г., Селифонтов Д.О. Анализ конструкционных и защитных материалов современных изделий СПВ / Сборник материалов II Всероссийской научно-технической онлайн-конференции «Стрелковое оружие: вчера, сегодня, завтра», Тула, ТулГУ, 2014. С. 80-90.
14. Стариков Н.Е., Гвоздев А.Е., Бреки А.Д., Селифонтов Д.О. Анализ номенклатуры и требования, предъявляемые к материалам изделий СПВ / В сборнике материалов II Всероссийской НПК «Калашниковские чтения». Ижевск: Издательство ИжГТУ им. ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2016. 2. С. 37- 44.
15. Лаврушин А.В., Стариков Н.Е. Анализ конструкционных материалов, применяемых в современных образцах стрелково-пушечного вооружения, используемых в частях и соединениях ВДВ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 6. С. 229-236.
16. Лаврушин А.В., Стариков Н.Е. Методика оценки изменения технического состояния стрелково-пушечного вооружения при воздействии на него факторов окружающей среды // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 6. С. 272-285.

Селифонтов Денис Олегович, аспирант, denis-selifontov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

*MATERIALS APPLIED FOR MANUFACTURE OF MODERN SAMPLES
OF SALVAGE, AND METHODS OF THEIR PROTECTION*

The nomenclature of modern examples of rifle and cannon weapons, which includes automatic small arms and small-caliber artillery weapons, is considered. It is also the object of research of the stoich of materials of weapons to microbiological and corrosion damage. The analysis of the composition of the materials used for the manufacture of SPS products is carried out, and methods for their protection against corrosion and biodeterioration are presented.

Key words: rifle and cannon armament, material, coating, lubricant, corrosion, bio-deterioration.

Selifontov Denis Olegovich, postgraduate student, denis-selifontov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 78.21.35

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КОМПЛЕКСНОМУ ОЦЕНИВАНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Я.Н. Гусеница, А.В. Малахов, А.Н. Новиков

В работе проведен анализ существующего и предложен новый научно-методический подход к комплексному оцениванию эффективности метрологического обеспечения войск (сил). Актуальность работы определяется противоречием, которое заключается, с одной стороны, в необходимости оценивать степень реализации цели метрологического обеспечения войск (сил), а, с другой стороны, отсутствием системы показателей, позволяющих комплексно оценить эффективность метрологического обеспечения с учетом современных требований к метрологическим воинским частям и подразделениям. Опираясь на теорию эффективности целенаправленных процессов, предлагается система показателей эффективности метрологического обеспечения войск (сил), методика оценивания данных показателей, методика расчета весовых коэффициентов функций метрологического обеспечения, а так же программная реализация методик.

Ключевые слова: эффективность, метрологическое обеспечение, комплексный показатель, результативность, ресурсоемкость, оперативность, весовой коэффициент, готовность, устойчивость, экспертное оценивание, компетентность.

В настоящее время одним из важнейших компонентов материально-технического обеспечения войск (сил) является метрологическое обеспечение, под которым понимается комплекс мероприятий по установлению и применению научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемых точности, полноты, своевременности и оперативности измерений в войсках (силах).

Для определения степени реализации метрологического обеспечения войск (сил) необходимо располагать некоторым показателем эффективности. Данный показатель эффективности представляет собой переменную (несколько переменных), значение которой характеризует степень достижения целей метрологического обеспечения войск (сил).

Существует несколько подходов к оцениванию показателя эффективности метрологического обеспечения войск (сил).

В одном из таких подходов показатель эффективности метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники на стадии производства представляет собой суммарные потери, которые оценивают следующим образом [1]:

$$C = C_1 P \alpha_0 + C_2 (1 - P) \beta_0 \quad (1)$$

где C_1, C_2 , – стоимость ущерба, наносимого ошибочными решениями соответственно из-за ошибок 1-го и 2-го рода; P – вероятность поступления на контроль годного образца; α_0, β_0 – условные вероятности ложного и не обнаруженного дефектов (ошибки 1-го и 2-го рода), которые определяются с применением графиков зависимости достоверности приемочного контроля от точности измерений.

Вместе с тем, представленный выше подход имеет ограниченную область применения и не может использоваться на стадии эксплуатации вооружения, военной и специальной техники. Это обусловлено тем, что на стадии эксплуатации вооружения, военной и специальной техники необходимо учитывать влияние результатов измерений на уровень тактико-технических характеристик и принятие решения о готовности вооружения, военной и специальной техники к применению по целевому назначению.

Кроме того, любой показатель эффективности целенаправленных процессов должен быть [2]:

- представительным, т.е. позволяющим оценивать эффективность по достижению основной (а не второстепенных) цели;
- критичным, т.е. чувствительным к изменениям исследуемых факторов;
- комплексным, т.е. позволяющим охарактеризовать степень достижения цели без привлечения других показателей;
- стохастичным, т.е. позволяющим учитывать неопределенность условий целенаправленных процессов, которая обусловлена воздействием случайными факторов.

Следовательно, задача оценивания эффективности метрологического обеспечения войск (сил), являющаяся весьма актуальной.

Система показателей эффективности метрологического обеспечения

Для решения указанной задачи в настоящей статье предлагается научно-методический подход к комплексному оцениванию эффективности метрологического обеспечения войск (сил). Данный подход основан на использовании системы показателей эффективности метрологического обеспечения войск (сил), которая представлена рис. 1 и в табл. 1.

Представленные показатели условно можно объединить в три группы:

- целевые;
- обеспечивающие;
- защитные.

Целевые показатели косвенно характеризуют эффективность, т.е. степень достижения цели метрологического обеспечения войск (сил). Среди них выделяют [3]:

- показатели результативности;
- показатели ресурсоемкости;
- показатели оперативности.

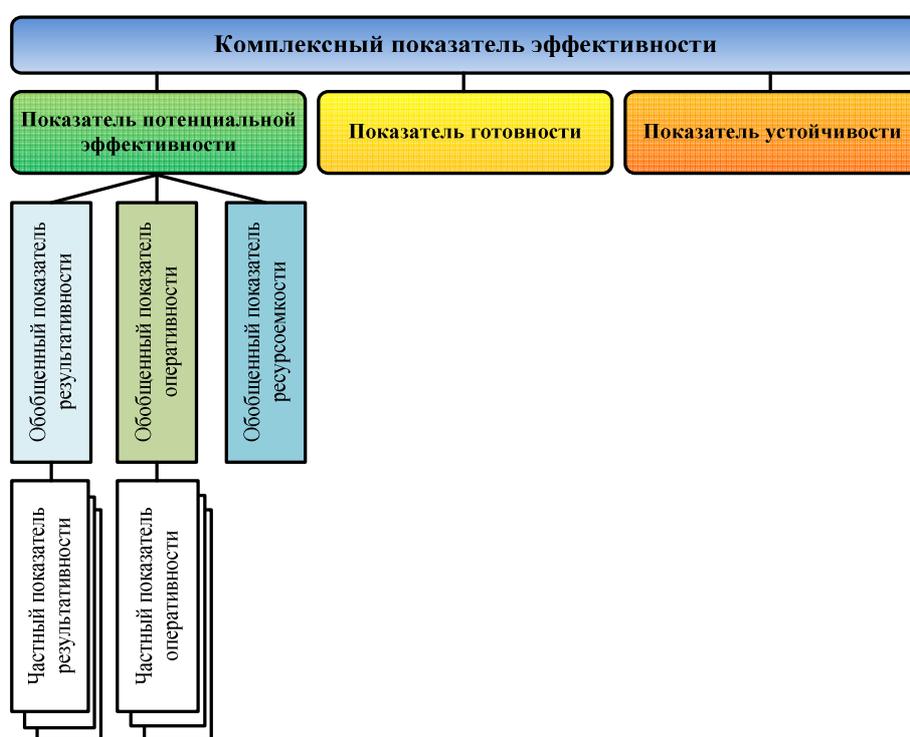


Рис. 1. Система показателей эффективности метрологического обеспечения войск (сил)

Показатели результативности предназначены для количественного описания положительного эффекта, получаемого в результате метрологического обеспечения войск (сил).

Каждый частный показатель результативности отражает числовое значение способности выполнения какой-либо конкретной функции метрологического обеспечения войск (сил). Перечень конкретных функций для метрологического обеспечения войск (сил) определяется соответствующими руководящими документами. Для расчета частных показателей результативности метрологического обеспечения войск (сил) используется следующая формула:

$$V_i = \frac{N_{\text{факт } i}}{N_{\text{план } i}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{факт } i}$ – количество выполненных задач в ходе реализации i -й функции; $N_{\text{план } i}$ – количество запланированных задач в ходе реализации i -й функции.

Таблица 1
Система показатели эффективности метрологического обеспечения

№ функции	Наименование функции	Показатель потенциальной эффективности			Показатель готовности	Показатель устойчивости
		Показатели результативности	Показатели оперативности	Показатели ресурсоемкости		
1	Испытание средств измерений	V_1	T_1	С	P_r	P_y
2	Аккредитация МВЧП	V_2	T_2			
...			
$i-1$	Поверка средств измерений	V_{i-1}	T_{i-1}			
i	Метрологический надзор	V_i	T_i			
$i+1$	Аттестация методик измерений	V_{i+1}	T_{i+1}			
...			
M	Снабжение войск (сил) средствами измерений	V_M	T_M			

На основе частных показателей может быть рассчитан обобщенный показатель результативности. Для этого используется следующая формула:

$$V = \sum_{i=1}^M \alpha_i^{\Phi} V_i, \quad (3)$$

где M – общее количество задач метрологического обеспечения войск (сил); α_i^{Φ} – весовой коэффициент i -й функции метрологического обеспечения войск (сил). При этом на весовые коэффициенты накладывается условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^M \alpha_i^{\Phi} = 1. \quad (4)$$

Показатели оперативности предназначены для количественного описания расхода времени, потребного для метрологического обеспечения войск (сил).

Каждый частный показатель оперативности отражает способность выполнять какую-либо конкретную функцию в отведенные сроки. Для расчета частных показателей оперативности метрологического обеспечения войск (сил) используется следующая формула:

$$T_i = 1 - \frac{N_i(t_i > t_i^D)}{N_{\text{факт}i}} \quad (5)$$

где $N_i(t_i > t_i^D)$ – количество выполненных задач в ходе реализации функции i -й функции, время выполнения t_i которых превышает допустимое значение t_i^D , указанное руководящими документами.

На основе частных показателей может быть рассчитан обобщенный показатель оперативности. Для этого используется следующая формула:

$$T = \sum_{i=1}^M \alpha_i^{\Phi} T_i. \quad (6)$$

Обобщенный показатель ресурсоемкости предназначен для количественного описания расхода финансовых ресурсов, потребных для метрологического обеспечения войск (сил). Для его расчета используется следующая формула:

$$C = \frac{C_{\min}}{C_{\text{тек}}}, \quad (7)$$

где C_{\min} – минимальные расходы финансовых ресурсов на метрологическое обеспечение войск (сил); $C_{\text{тек}}$ – текущие расходы финансовых ресурсов на метрологическое обеспечение войск (сил).

На основе обобщенных показателей результативности, оперативности и ресурсоемкости может быть рассчитан показатель потенциальной эффективности метрологического обеспечения войск (сил). Данный показатель характеризует степень достижения цели метрологического обеспечения войск (сил) при условии, что оно готово и отсутствуют воздействия различных видов внешних и внутренних факторов. В виду того, что V , T и C являются вероятностями несовместных событий, показатель потенциальной эффективности метрологического обеспечения войск (сил) представляет собой вероятность достижения цели метрологического обеспечения войск (сил) в идеальных условиях и может быть вычислен по следующей формуле:

$$P_{\text{ц}} = V \cdot T \cdot C. \quad (8)$$

Защитные показатели описывают такие свойства метрологического обеспечения войск (сил), которые связаны с его защитой от возмущающих воздействий различного рода. Основным таким показателем является показатель устойчивости, в качестве которого выступает вероятность сохранения функций по метрологическому обеспечению войск (сил) в условиях воздействия различных видов внешних и внутренних факторов. Данная вероятность может быть вычислена по формуле, представленной в работе [3]:

$$P_y = \frac{N_{PM}^{mob}}{N_{PM}}, \quad (9)$$

где N_{PM} – фактическое количество рабочих мест по поверки средств измерений; N_{PM}^{mob} – количество рабочих мест по поверки средств измерений, используемых в составе мобильных метрологических комплексов.

Обеспечивающие качества формализуют эксплуатационно-технические свойства метрологического обеспечения войск (сил). Особенностью данных показателей является то, что они оказывают влияние на значение целевых и защитных показателей.

Основным обеспечивающим показателем является показатель готовности метрологического обеспечения войск (сил). Данный показатель представляет собой вероятность того, что метрологическое обеспечение войск (сил) окажется готовым к использованию по назначению в произвольный момент времени. Это вероятность зависит от наличия готовых к применению личного состава, рабочих мест и нормативно-технической документации. Поэтому для ее расчета предлагается следующая формула:

$$P_G = \frac{N_{л/с}}{N_{л/с}^{штат}} \cdot \frac{N_{PM}}{N_{PM}^{штат}} \cdot \frac{N_{НТД}}{N_{НТД}^{штат}}, \quad (10)$$

где $N_{л/с}$, $N_{НТД}$ – фактическое количество личного состава, нормативно-технической документации соответственно; $N_{л/с}^{штат}$, $N_{PM}^{штат}$, $N_{НТД}^{штат}$ – предусмотренное штатом количество личного состава, рабочих мест по поверки средств измерений и нормативно-технической документации соответственно.

На основе $P_{ц}$, P_G и P_y может быть получен комплексный показатель эффективности метрологического обеспечения войск (сил):

$$W = P_3 \cdot P_G \cdot P_y. \quad (11)$$

Данный показатель представляет собой не что иное, как вероятность достижения цели метрологического обеспечения войск (сил) в реальных условиях, т.е. с учетом воздействия различных видов внешних и внутренних факторов.

Следовательно, задача оценивания эффективности метрологического обеспечения войск (сил) сводится к получению исходных данных, расчету частных показателей, представленных в табл. 1, и свертке данных показателей в единый комплексный показатель эффективности в соответствии с иерархией показателей, изображенной на рис. 1.

Методика расчета весовых коэффициентов функций метрологического обеспечения

При свертке частных показателей эффективности используются весовые коэффициенты, представляющие собой оценку «важности» той или иной функции метрологического обеспечения войск (сил).

Для получения числовых значений весовых коэффициентов применяется метод экспертных оценок. При этом с помощью экспертов выполняется ранжирование рассматриваемых функций метрологического обеспечения войск (сил) по их важности, что позволяет определить весовые коэффициенты «важности» частных показателей результативности и оперативности.

Методика получения весовых коэффициентов предполагает реализацию следующих этапов.

На первом этапе требуется определить достаточное количество привлекаемых экспертов. В качестве экспертной группы выступает личный состав метрологических воинских частей и подразделений (МВЧП), научных исследовательских организаций (НИО), занимающихся вопросами метрологического обеспечения войск (сил), а так же высших учебных заведений, осуществляющих подготовку военных специалистов-метрологов. При этом на основе критериев и шкал (табл. 2) каждый привлекаемый j -й эксперт оценивается коэффициентом компетентности q_j с помощью следующего выражения:

$$q_j = \frac{\sum_{l=1}^L v_{jl}}{\sum_{l=1}^L v_{l \max}}, \quad (12)$$

где v_{jl} – вес j -го эксперта по l -му критерию; $v_{l \max}$ – предельный вес l -го критерия; L – общее количество критериев.

Таблица 2

Критерии и шкалы уровня компетентности экспертов

Критерий Вес	Уровень образования экспертов	Занимаемая должность	Опыт работы в области метрологического обеспечения
1	Бакалавр	Младший научный сотрудник, научный сотрудник, начальник отделения МВЧП, заместитель начальника отдела МВЧП	не менее 2 лет

Критерий Вес	Уровень образования экспертов	Занимаемая должность	Опыт работы в области метрологического обеспечения
2	Специалист	Старший научный сотрудник, преподаватель, начальник отдела МВЧП,	от 2 до 3 лет
3	Магистр	Начальник лаборатории НИО, старший преподаватель, заместитель начальника МВЧП, начальник МВЧП	от 3 до 4 лет
4	Кандидат наук	Начальник отдела НИО, заместитель начальника отдела НИО, доцент, профессор	от 4 до 5 лет
5	Доктор наук	Начальник НИО, заместитель начальника НИО, начальник кафедры	более 5 лет

Численность группы экспертов определяется из условия [4]:

$$M \leq J \leq \frac{3 \cdot \sum_{j=1}^J q_j}{2 \cdot q_{\max}}, \quad (13)$$

где $q_{\max} = 1$ – максимально возможное значение коэффициента компетентности экспертов.

Если условие (13) не выполняется, то в экспертную группу привлекается еще один или несколько экспертов. В результате формируется экспертная группа, которая характеризуется матрицей-строкой компетентности:

$$Q = (q_j)_{j=1..J} = (q_1, q_2, \dots, q_J). \quad (14)$$

На втором этапе каждый j -й эксперт выставляет субъективную оценку $\beta_{ij} \in [0,1]$ для каждой i -й функции метрологического обеспечения. Эта оценка по мнению j -го эксперта отражает степень «важности» i -й функции метрологического обеспечения войск (сил).

По итогам второго этапа формируется матрица субъективных весовых коэффициентов функций метрологического обеспечения войск (сил):

$$B = (\beta_{ij}) = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1J} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{M1} & \beta_{M2} & \dots & \beta_{MJ} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

На третьем этапе осуществляется преобразование матрицы B в матрицу \bar{B} , учитывающую уровень компетентности экспертов:

$$\bar{B} = (\bar{\beta}_{ij}) = \begin{pmatrix} \bar{\beta}_{11} & \bar{\beta}_{12} & \dots & \bar{\beta}_{1J} \\ \bar{\beta}_{21} & \bar{\beta}_{22} & \dots & \bar{\beta}_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{\beta}_{M1} & \bar{\beta}_{M2} & \dots & \bar{\beta}_{MJ} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Для этого элементы матрицы B и матрицы-строки компетентности Q подставляются в следующее выражение:

$$\bar{\beta}_{ij} = \beta_{ij} \cdot q_j. \quad (17)$$

На четвертом этапе формируются групповые оценки весовых коэффициентов функций метрологического обеспечения войск (сил). Для этого каждый элемент матрицы \bar{B} подставляются в следующее выражение:

$$\bar{\alpha}_i^{\phi} = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{\beta}_{ij}}{J}. \quad (19)$$

На пятом этапе происходит окончательный расчет весовых коэффициентов функций метрологического обеспечения войск (сил) с учетом условия нормировки (4). Для этого используется следующее выражение:

$$\alpha_i^{\phi} = \frac{\bar{\alpha}_i^{\phi}}{\sum_{i=1}^M \bar{\alpha}_i^{\phi}}. \quad (20)$$

Программная реализация оценивания эффективности метрологического обеспечения войск (сил)

Для автоматизированного оценивания эффективности метрологического обеспечения войск (сил) авторами разработана программа [5]. Эта программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- хранение данных об экспертах, организациях, осуществляющих метрологическое обеспечение, функциях и частных показателях эффективности метрологического обеспечения [6];
- оценивание уровня компетентности экспертов;
- формирование коэффициентов относительной важности функций и частных показателей эффективности метрологического обеспечения;
- расчет показателей потенциальной эффективности, готовности, устойчивости и комплексного показателя эффективности метрологического обеспечения [7];
- графическое отображение динамики состояния метрологического обеспечения.

Исходные данные, а также результаты оценивания эффективности метрологического обеспечения войск (сил) МВЧП хранятся в базе данных, которая может быть установлена на сервере локальной вычислительной сети для одновременного использования программы несколькими пользователями.

Регистрация экспертов осуществляется с помощью диалогового окна, представленного на рис. 2. В этом окне каждый эксперт вводит фамилию, имя, отчество, занимаемую должность, уровень образования и опыт работы в области метрологического обеспечения.

Рис. 2. Диалоговое окно для ввода данных об экспертах

Каждый зарегистрированный эксперт с помощью диалогового окна, приведенного на рис. 3, определяет коэффициенты важности функций метрологического обеспечения.

Наименование функции	Важность функции
Аккредитация МВЧП	0,5
Аттестация методик измерений	0,5
Испытания и утверждение типа СИ	0,3
Осуществление метрологического надзора	0,4
Снабжение войск (сил) СИ	0,6

Рис. 3. Коэффициенты важности показателей качества

Формирование исходных данных о МВЧП осуществляется с помощью диалогового окна, показанного на рис. 4 и 5.

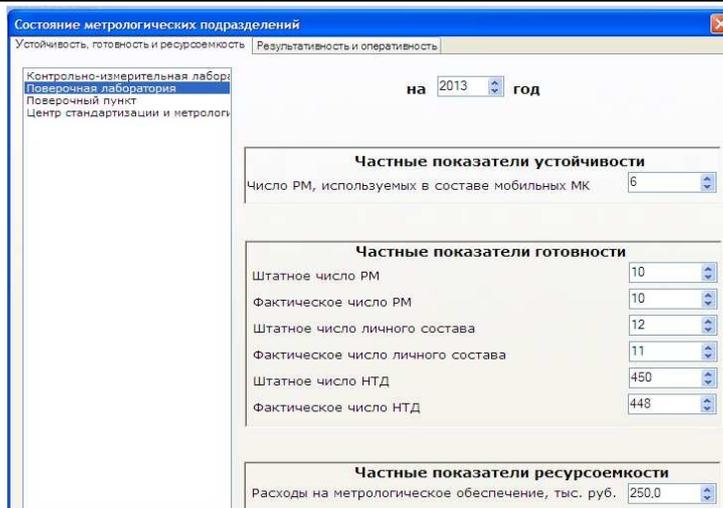


Рис. 4. Вкладка диалогового окна для формирования частных показателей устойчивости, готовности и ресурсоемкости

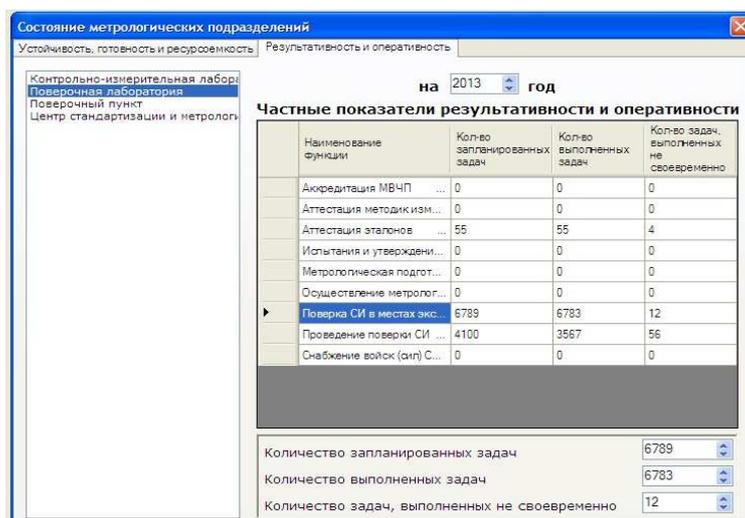


Рис. 5. Вкладка диалогового окна для формирования частных показателей результативности и оперативности

Здесь вводятся количество запланированных и выполненных задач в ходе реализации каждой функции, количество выполненных задач не своевременно, фактическое и предусмотренное штатом количество личного состава, нормативно-технической документации, рабочих мест по поверки средств измерений, а также количество рабочих мест по поверки средств измерений, используемых в составе мобильных метрологических комплексов.

Оценивание и вывод оценок показателей эффективности метрологического обеспечения реализуется в диалоговом окне, представленном на рис. 6. В нем результаты оценивания эффективности метрологического обеспечения приведены в табличной форме и графическом виде.

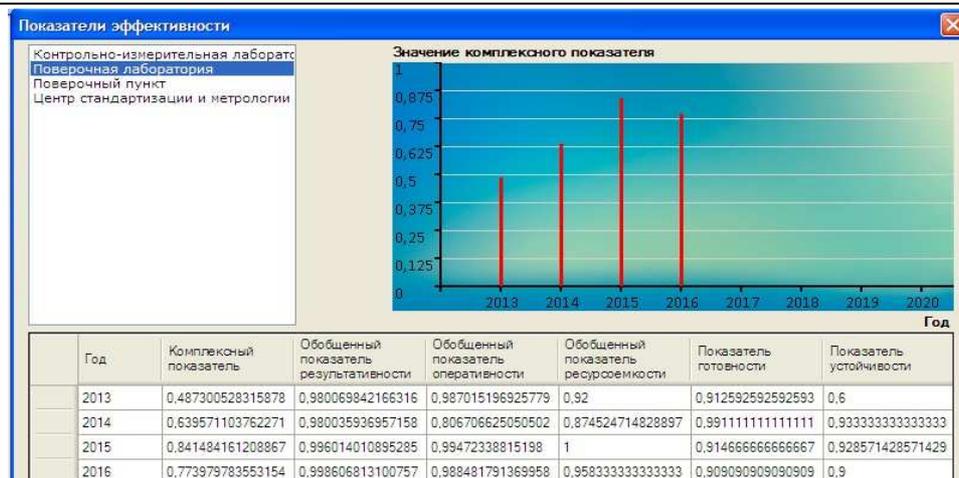


Рис. 6. Диалоговое окно отображения оценок показателей эффективности метрологического обеспечения

Заключение

Таким образом, научная новизна представленных в статье результатов состоит в разработке системы показателей эффективности метрологического обеспечения, методики их оценивания, методики расчета весовых коэффициентов функций метрологического обеспечения, программной реализации вышеперечисленных методик. Полученные в работе результаты имеют теоритическое и практическое значение и могут быть использованы при военно-научном и технико-экономическом обосновании разработки перспективных систем метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники, а так же анализе и повышении эффективности уже существующих систем.

Список литературы

1. Сычев Е. И. Основы метрологии военной техники / Е. И. Сычев, В. Н. Храменков, А.Д. Шкитин. М.: Военное издательство, 1993. 399 с.
2. Петухов Г. Б. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем / Г. Б. Петухов, В. И. Якунин. М.: АСТ, 2006. 504 с.
3. Гусеница Я.Н. Информационные технологии в области метрологического обеспечения вооружения и военной техники: учебное пособие / Я.Н. Гусеница, А.Н. Новиков, С.А. Шерстобитов, А.В. Малахов. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. 171 с.
4. Гусеница Я.Н. Методика обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники / Я.Н. Гусеница, А.Н. Новиков // Информация и космос. № 2 (7). 2017. С. 154-159.
5. Программа расчета комплексного показателя качества функционирования системы метрологического обеспечения / Я.Н. Гусеница, А.В. Малахов, С.А. Шерстобитов, А.П. Демин // Свидетельство о государ-

ственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616922, дата поступления 29.04.2016 г., дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2016 г.

6. Малахов А.В. Постановка задачи формирования технического облика реконфигурируемых мобильных метрологических комплексов / А.В. Малахов, Я.Н. Гусеница, А.А. Куприянов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 9. Ч. 1. С. 469-475.

7. Волков А.А. Оптимизация маршрутов выездных метрологических групп при проведении аттестации дозиметрических поверочных установок / А.А. Волков, А.В. Малахов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 6. С. 200-206.

Гусеница Ярослав Николаевич, канд. тех. наук, начальник испытательной лаборатории (информатики и вычислительной техники), yaromir226@mail.ru, Россия, Анапа, Военного инновационного технополиса 'ЭРА',

Малахов Александр Владимирович, канд. тех. наук, начальник отдела измерительной техники, sanya-mall@yandex.ru, Россия, Москва, 1 Филиал Главного научного метрологического центра Минобороны России,

Новиков Александр Николаевич, канд. тех. наук, доцент, novalloll@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космической академия имени А.Ф.Можайского

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACH TO COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF METROLOGICAL SUPPORTS

Ya.N. Gusenitsa, A.V. Malakhov, A.N. Novikov

In article is presents scientific and methodical approach to comprehensive assessment of the efficiency of metrological supports forces. The relevance of the work is determined by the contradiction that is, on the one hand, the need to assess the degree of realization of the purpose of metrological provision and, on the other hand, the absence of a system of indicators that allow the complex to assess the effectiveness of metrological support to meet modern requirements for metrology departments. Based on the theory of the effectiveness of targeted processes, a system performance of metrological support forces, methods of evaluation of these indicators, the method of calculating the weighting coefficients of metrological support functions, as well as software implementation methods.

Key words: efficiency, metrological providing, complex indicator, productivity, resource intensity, efficiency, weight coefficient, readiness, stability.

Gusenitsa Yaroslav Nikolaevich, candidate of technical sciences, teacher of chair of metrological providing, yaromir226@mail.ru, Russia, Anapa, Military innovative Technopolis 'ERA',

Malakhov Alexander Vladimirovich, candidate of technical sciences, head of testing laboratory (Informatics and computer engineering), sanya-mall@yandex.ru, Russia, Moscow, 1 Branch of the Main scientific metrological center of the Ministry of Defence of the Russian Federation,

Novikov Alexander Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, novalloll@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military space academy of A.F.Mozhaysky

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ОБЛИКА САМОЛЕТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ

М.Ю. Куприков, Л.Н. Рабинский

Дан анализ влияния инфраструктурны на выбор альтернативных вариантов силовых установок самолетов вертикального взлета и посадки. Рассмотрен алгоритм получения комбинированной схемы силовой установки, как разрешение противоречия между единой и составной схемами силовой установки самолетов вертикального взлета и посадки. Приведен метод компоновки самолета от виртуального центра масс, позволяющий получить компоновочную схему самолета из условий инфраструктурных ограничений на палубе авианесущего крейсера. Предложен метод синтеза новых схемных решений самолета. Дано графическое представление концепции легкого маневренного самолета с палубным базированием, обеспечивающим вертикальное положение самолета при взлете и горизонтальное на посадке.

Ключевые слова: самолет, силовая установка, схемы, вертикальный взлет, геометрия, компоновка, облик, инфраструктура, авианосцы.

Одной из самобытных страниц отечественного авиастроения являются самолёты вертикального взлета и посадки (СВВП). Робкие попытки их создания конструкторские бюро А.С.Яковлева (на примере семейства Як-36, Як-38 и Як-141). С ними в одном ряду стоят попытки ОКБ П.О. Сухого (Су-15ВД, Т-6) и ОКБ А.И.Микояна (МиГ-23ПД, МиГ-23-01) создания самолетов, у которых длина ВПП сокращалась за счет установки подъемных двигателей. Разработка самолетов сопровождалась значительными финансовыми и временными затратами и за основу были взяты более простые и результативные проектно-конструкторские решения. Идея вертикального взлета будоражила умы авиаторов с первых дней рождения авиации, но цена бала велика, а отдача минимальна. Есть задачи, которые кроме СВВП никто больше решить не может. Например, задача объектового ПВО. Для охранения сухогрузов при транспортировке обогащенной урановой руды из ЮАР в США используется ударная авианесущая группа. Однако, можно, в контейнере на сухогрузе базировать несколько СВВП и их будет достаточно для перехвата стратегического бомбардировщика над акваторией океана до пуска ракеты воздух-поверхность.

Успехи вертолетостроения [8] и самолетостроения [4-6] похоронили несколько концепций летательных аппаратов, например, дирижабли, гидроавиацию, автожиры. После бурного рассвета эти направления авиационной отрасли увядали и оставались одиночные, скорее экзотические, аппараты.

Идея вертикального взлета и посадки заставляет нас все чаще и чаще обращаться к тем идеям и разработкам отечественного и зарубежного авиапрома, которые создают научно-экспериментальную базу и опытно-

технологический задел к созданию летательных аппаратов обладающих качественно лучшими взлетно-посадочными характеристиками. На рис. 1 представлена матрица многообразия альтернативных вариантов силовых установок аппаратов вертикального взлета[6].

Способы создания подъемной силы и тяги			Возможные схемы летательного аппарата	$P_{в}/F_{сх}$ в даПа	$t_{ср}$ °C	V_{max} км/час	K_{max} х	Тип ЛА
Горизонтальный полет		Режимы ВПП Подъемная тяга						
Подъемная сила	Тяга							
Несущий винт с механическим или реактивным приводом				25-50	Температура окружающей среды	280-350	3,5-4,5	Вертолет
Несущий винт + крыло	Воздушный винт	Несущий винт				450-550	6-7	Высотный
Крыло	ТРДД	Несущий винт (убирающийся)				750-850	6-7 (10-12)	Преобразовательный ЛА
Крыло	Воздушный винт (винт в кольце)	Единная СУ	Поворот винтов		100-400	650-750	10-14	Самолеты ВВП
			Поворот двигательной установки					
			Поворот крыла с двигательной установкой					
	Турбореактивный двигатель (ТРД, ТРДД, ТВД)	Раздельная СУ	Подъемно-маршевый ТВД		2500-3000	200-400		
			Подъемно-маршевый ТРД (ТРДД)		5000-12000	600-1000		
			Подъемные ТРД (ТРДД)					
		Подъемные ТРД (ТРДД), поворот маршевого двигателя						
		СУ с агрегатом усиления тяги	Комбинированная СУ	Подъемные (подъемно-маршевые) вентиляторы		1000-2500	100-150	
				Эжекторные усилители тяги				
			СУ с агрегатом усиления тяги	Вьюсная форсажная камера				
Вьюсная форсажная камера				12000-13000	1000-1200			

Рис. 1. Матрица многообразия альтернативных вариантов силовых установок аппаратов вертикального взлета, составленная профессором Н.К.Лисейцевым [6]

Диалектика развития схем связана с увеличением удельной мощности силовых установок, а, следовательно, газо-динамической мощности струи из двигателя. Так тяговооруженность современных истребителей и без вертикального взлета давно превысила единицу. А это означает, что надо разумно распорядиться этим высоким тяговым потенциалом и на взлетно-посадочных режимах.

Используя матрично топологический подход, можно предположить, что по мере совершенства энергетических силовых установок ЛА и далее будут происходить попытки реализации концепции вертикального взлета и посадки. В авиационном комплексе самым уязвимым местом, которое видно и оптически, и радиолокационно, и со спутников является авиационная база и ее основной элемент взлетно-посадочная полоса. Что очень критично для военной авиации. Часто аэропорт находится в центре города, когда жилые кварталы соседствуют с авиационной инфраструктурой, а над головами у изумленной публики идут на посадку огромные магистральные лайнеры. Такую ситуацию знают не по наслышке жители Парижа и Лондона, Берлина и Дели, да и в Москве два летных поля (Ходынское и Тушинское) оказались в центре города и уже застроены жилыми кварталами, а все подмосковные аэропорты (Шереметьево, Домодедово, Внуково и Жуковский) в ближнем пригороде среди плотной дачной застройки. Практика эксплуатации военных самолетов показывает широкое многообразие условий базирования. Для примера рассмотрим условия базирования тактической авиации.

Если говорить о палубной авиации, то имеются следующие подклассы авианесущих кораблей: многоцелевые атомные авианосцы, авианосцы, противолодочные авианосцы, легкие авианосцы, ракетные крейсера-вертолетоносцы и вертолетоносцы. Однако, не вдаваясь в подробности тактического назначения авианосцев, можно выделить три характерные группы авианесущих кораблей. Характеристическим признаком в этой ситуации служит тип самолета, а точнее требования по длине ВПП, предъявляемые к данному типу самолетов (рис. 2.).

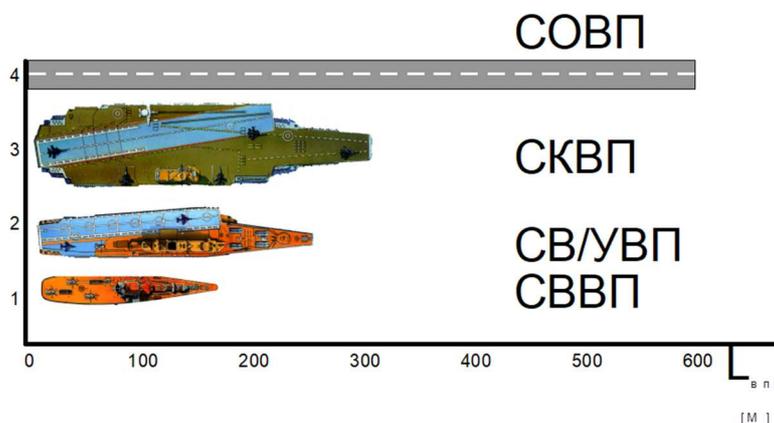


Рис. 2. Классификация самолетов в зависимости от типа взлета

Длина ВПП и оснащенность палубы устройствами, необходимыми для ее сокращения, практически однозначно характеризуют размерность авианесущего судна. В качестве примера рассмотрим деление авианесущих кораблей в зависимости от располагаемой длины ВПП (табл. 2).

Легкие авианосцы (типа Москва (СССР), Ленинград (СССР) "Жанна д'Арк" (Франция), типа "Андреа Дориа" (Италия) и др.), часто в литературе называемые крейсерами-вертолетоносцами, предназначены для базирования вертолетов и СВВП и выполняют функции ПЛО, а также поддержки высадки десанта и выброса его передового отряда. Они не имеют сплошной, по всей длине корабля, полетной палубы, а оборудованы специально подготовленными взлетно-посадочными площадками или установками, габаритные размеры которых соизмеримы с габаритами самого летательного аппарата. В большей части их водоизмещение менее 13000т.

Таблица 2

Классификация авианесущих кораблей в соответствии с располагаемой длиной ВПП

№	Тип авианесущего корабля	Длина ВПП [м]	Качественный признак – степень оснащенности взлетно-посадочными устройствами
1	Легкий	до 100	Отсутствует
2	Средний	100 - 200	Трамплин
3	Тяжелый	200 - 360 и более	Паровая катапульта

Средние авианосцы ("Адмирал Флота Н.Г.Кузнецов" (Россия), "Баку" (СССР), "Киев" (СССР), типа "Инвинсибл"(Великобритания), "Принц Астурийский" (Испания) , "Вираат" (Индия)) предназначены для решения специфических ударных задач обеспечения ПВО, ПЛО соединений кораблей и конвоев. На них базируются легкие штурмовики и истребители взлетной массой до 20т. Эти авианосцы не имеют специального оборудования палубы и поэтому самолеты, которые базируются на них называют СВ/УВП – самолеты вертикального-ультракороткого взлета и посадки. Иногда палубы оборудованы трамплинами и аэрофинишерами. Водоизмещение этих кораблей в среднем колеблется в пределах от 13000 до 35000т.

Тяжелые авианосцы (типа "Дж.Кенеди"(США), типа "Нимитц" (Эйзенхауер, Винсон, Рузвельт), "Энтерпрайз", "Китти Хоук" и др.) - это, как правило, многоцелевые авианесущие корабли с атомной силовой установкой. Для них характерно базирование тяжелых штурмовиков взлетной массой до 40 т. (Дуглас А-3Д). Известен случай, когда в 1963 самолет заправщик Локхид КС-130F "Геркулес" с взлетной массой 54430 кг без по-

мощи катапульты взлетел с палубы авианосца "Форрестол" (США). Обеспечение базирования самолетов, выполняющих ударные операции, требует соответствующего авиатехнического оборудования: длинной и широкой (более двух стартовых позиций) полетной палубы (более 300 м), вместительного ангара, катапультных установок, вместительных лифтов-самолетоподъемников. В целом, это признаки кораблей с водоизмещением не менее 70 000т. На них базируются самолеты короткого взлета и посадки (СКВП).

Дальнейшее наращивание размерности авианосцев с целью увеличения длины и несущей способности полетной палубы затруднено из технологических соображений, поэтому при других условиях необходимо сухопутное базирование (СОВП-самолеты обычного взлета и посадки). Сухопутное базирование не исключает использование коротких ВПП, однако ограничения при этом во многом схожи с «палубными».

И для военной и для гражданской авиации с уменьшением габаритов мест базирования эффективность авиационной техники возрастает

Синтез новых схем самолета – это результат разрешения диалектических противоречий. Поиск новой схемы – это, прежде всего, глубокий анализ преимуществ и недостатков известных альтернативных вариантов схем и синтез на их базе принципиально нового технического решения, являющегося результатом решения поставленной задачи на новом техническом уровне (витке диалектической спирали).

На начальном этапе синтеза нового схемного решения проводится формирование характеристических матриц альтернативных схемных решений для удовлетворения каждого i -го требования. Характеристическая матрица каждого решения состоит из двух типов столбцов. Элементами первого типа столбцов являются семантические выражения, характеризующие положительные и отрицательные качества данного решения, а элементами второго типа столбцов являются нормированные оценки этих качеств (например, в диапазоне от -1 до +1). Записи в строках носят парный характер. Нормированные оценки могут быть сверткой экспертных оценок, либо обработкой данных статистики по известным образцам авиационной техники.

Каждое схемное решение имеет множество характеристических матриц, удовлетворяющих различным требованиям. Согласно множества ограничений выбираются матрицы, отвечающие этому множеству.

На втором этапе из альтернативных схемных решений происходит выбор диалектически противоположных пар схемных решений, для которых столбцы характеристических матриц носят зеркальный характер (имеют минимальное и максимальное значения). В той части матриц, где это условие выполняется, возможно формирование обобщенной характе-

ристической матрицы, соответствующей еще не существующему техническому решению. Далее каждой строке (характеристике) в соответствие ставится частное техническое решение, совокупность которых определяет то или иное схемное решение.

Данное условие является необходимым, но недостаточным для синтеза нового технического решения. Используя характеристические матрицы, можно определить направление технического развития.

Действие алгоритма рассмотрим на примере СВВП. В качестве альтернативных схемных решений рассмотрим схемы силовых установок, обеспечивающих самолету вертикальный взлет и посадку, т.е. в качестве инфраструктурного ограничения принято, что $u = u_1(L_{ВПВ}=0)$. В таблице 3 представлен порядок процедуры сравнения характеристических матриц самолетов с единой и с составной силовыми установками (СУ) и формирование технического решения – комбинированная СУ.

Таблица 3

Пример алгоритма получения комбинированной схемы СУ, как разрешение противоречия между единой и составной схемами СУ самолетов вертикального взлета и посадки

№	Порядок процедур и логических рассуждений	Значения			
1	Определяем требуемые тяговооруженности:	-	-	-	-
	вертикальная на висение	1	-	-	-
	с учетом ускорения	1.03	-	-	-
	с учетом потерь	1.2	-	-	-
	с учетом затрат на СУДРП	1.3	-	-	-
	горизонтальная	0.6	-	-	-
2	Выбираем два альтернативных типа силовых установок	-	Единая СУ	-	Составная СУ
3	Определяем располагаемые тяговооруженности:	-	-	-	-
	горизонтальная	-	1.3	-	0.6
	проявление зеркальной противоположности	-	max	-	min
	суммарная	-	1.3	-	1.7
4	Формируем базовую гипотезу – “Тяговооруженность по ПМД соответствует потребной горизонтальной “			0.6	
5	Недостающую вертикальную тяговооруженность реализуем за счет ПД	-	-	0.65	-
6	В результате получена СУ состоящая из ПМД и ПД	-	-	Комбинированная СУ	-
7	Сравнительная оценка альтернативных вариантов СУ:	-	-	-	-
	относительная масса пустого самолета	-	0.72	0.66	0.83
	Соотношение по относительной массе	-	-0.06	0	-0.17

Вышеприведенная таблица иллюстрирует диалектику трансформации схем СУ СВВП. На рис. 3 условно представлен граф изменений и диалектических противоречий, разрешение которых привело к появлению новых схемных решений.

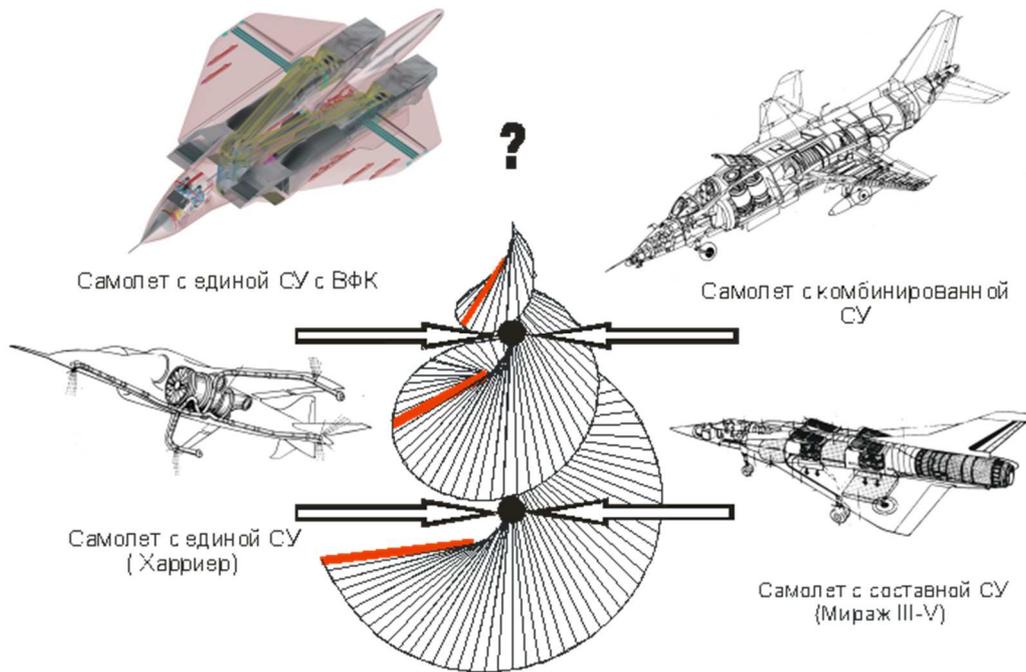


Рис. 3. Диалектическая спираль графа формирования новых схем СВВП

На первом этапе развития СВВП, относящемся к 50-60-м годам, в качестве СУ использовались единая и составная силовые установки. Зеркальная противоположность нормированных показателей качеств основных характеристик наглядно видна из табл. 3. Потребные тяговооруженности, используемые самолетами, выполненными по единой и составной схемам силовых установок, имеют одинаковые значения при вертикальном взлете, а располагаемые горизонтальные тяговооруженности имеют либо минимальное (для составной СУ), либо максимальное для единой СУ) значение для этого класса самолетов. Компромиссным решением, позволившим решить как противоречие, связанное с выбором основных параметров самолета (вертикальной и горизонтальной тяговооруженности), так и компоновочные противоречия по взаимной увязке компоновочных объемов в центральной части самолета при размещении центроплана, внутреннего отсека вооружений, ниши основных стоек шасси, расходного топливного бака и т.д. при условии обеспечения минимальных моментов инерции, габаритных ограничений и аэродинамических форм, явилась схема самолета с комбинированной СУ. Эта схема СУ позволила обеспечить потребные вертикальную и горизонтальные стартовые тяговооруженности, отличие которых по абсолютному размеру более чем в два раза приводит к резкому снижению эффективности СВВП. В нижней строке таблицы 3 представлены сравнительные характеристики относительных масс пустого самолета, которые демонстрируют одну из граней этих преимуществ в количественном выражении.

Преимущества самолетов с комбинированной СУ отрицают схему с составной СУ и находятся в диалектическом противоречии уже со схемой самолета с единой СУ.

Суть противоречия второй пары заключается в появившихся проблемах с компоновкой задней открытой зоны соплового аппарата и лишь в половинчатом решении использования тяговооруженности подъемно-маршевого двигателя (ПМД) на всех режимах полета и сохранением качеств группы подъемных двигателей (ПД), присущих самолетам, выполненным по схеме с составной СУ. Актуальность разрешения этого противоречия возникла при разработке программ сверхзвуковых маневренных СВВП. Результатом разрешения этого противоречия является появившаяся в 70-х годах схема единой СУ с агрегатами усиления тяги. В качестве примера рассмотрим единую СУ с выносной форсажной камерой. Данная схема СУ позволяет разрешить противоречие второй пары и по компоновке и по тяговооруженности. По компоновочным признакам ВФК имеет зависимость эквивалентную самолетам с комбинированной СУ. По тяговооруженности самолет на бесфорсажном режиме соответствует характеристикам самолета с комбинированной схемой СУ (работает только ПМД).

Для СВВП силовая установка и система управления на доэволютивных режимах полета имеют как функциональную, так и конструктивную общность. Рассмотренные две предыдущие пары касались разрешения противоречий по компоновке и тяговооруженности лишь в части силовой установки. Рассмотрим противоречия между газодинамической струйной системой управления на доэволютивных режимах полета и системой управления посредством газодинамической, либо векторной модуляцией векторов тяг силовой установки. Характеристическими признаками как и в первом случае являются компоновка силовой установки, а точнее, компоновка точек приложения векторов тяг, при этом относительные затраты тяги на управление и балансировку самолета на доэволютивных режимах полета выступают в качестве критерия. Разрешение третьей пары противоречий сопровождается интеграцией СУ и системы управления на доэволютивных режимах полета (СУДПР).

На базе этого схемного решения был предложен СВВП оборудованный единой двухдвигательной силовой установкой с выносной форсажной камерой. Самолёт выполнен по аэродинамической балансировочной схеме «бесхвостка» и без вертикального оперения. Устойчивость и управляемость во всех трех каналах обеспечивает газодинамическая модуляция тяги двигателя и поворотных сопловые аппараты. Размерность самолета определена из условия базирования на легких авианесущих крейсерах размерности Киев, Минск, Новороссийск в габаритах лифта подъёмника 18*6*5,5 и составила 21 тонну (рис.4). Что позволило иметь во внутренних отсеках вооружения целевую нагрузку 2 тонны, что соответствует четырём ракетам класса воздух-воздух среднего радиуса действия. Проект

выполнен в Московском авиационном институте в 90-е годы группой дипломников А.Б.Аведьян, И.Неганов, К.Г.Евченко, И.Покровский под руководством В.З.Максимовича.

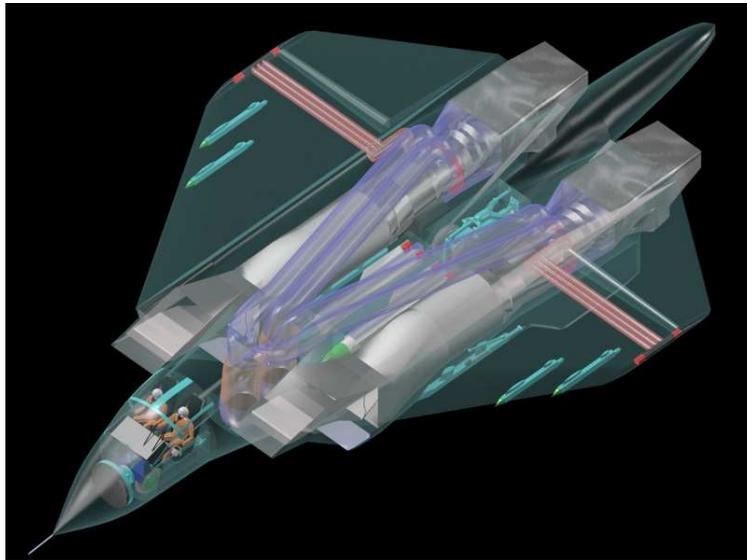


Рис. 4. Компоновка тяжелого СВВП палубного базирования

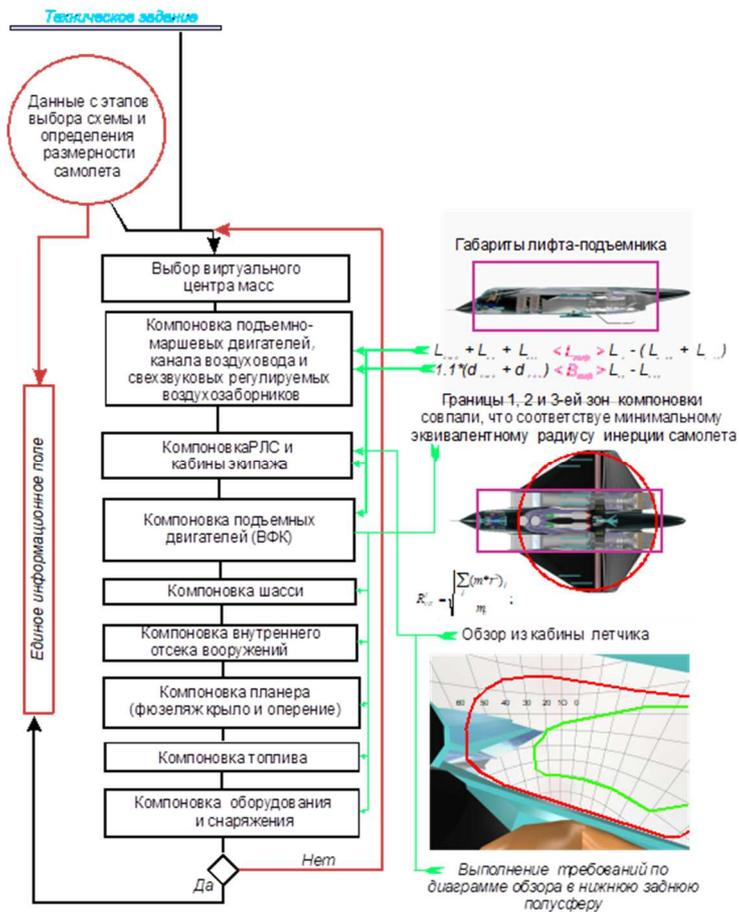


Рис. 5. Требования и алгоритм разрешения противоречий при компоновке СВВП



Рис. 6. Геометрический облик компоновки СВВП

На втором этапе из альтернативных схемных решений происходит выбор диалектически противоположных пар схемных решений, для которых столбцы характеристических матриц носят зеркальный характер. В той части матриц, где это условие выполняется, возможно формирование обобщенной характеристической матрицы, соответствующей еще не существующему техническому решению. Далее каждой строке (характеристике) в соответствие ставится частное техническое решение, совокупность которых определяет то или иное схемное решение (см. рис. 7).

Поиск решения на втором этапе рассмотрим на примере концепции взлета СВВП. Как было отмечено, возможны два варианта вертикального взлета и посадки самолета:

- самолеты с горизонтальным положением фюзеляжа на взлете и посадке;
- самолеты с вертикальным положением фюзеляжа на взлете и посадке.

Данные технические решения представляют пару диалектически противоположных схемных решений, как по сути взлета, так и по функциональному назначению.

Сформируем характеристическую матрицу потребной тяговооруженности СВВП на различных режимах полета (см. табл. 4).

Формирование обобщенной матрицы на решении, полученном в результате разрешения третьей пары противоречий, привело к выработке новой концепции СВВП, который осуществляет взлет с вертикальным, а по-

садку с горизонтальным положением фюзеляжа (рис.8 и 9). На рис. 3 представлены две исходные схемы самолетов и третья как результат синтеза новой схемы от данных характеристической матрицы. На полученные технические решения получены авторские свидетельства №1816717 и 1821421.

Таблица 4

Характеристическая матрица самолетов с альтернативными способами вертикального взлета и посадки

№	Признак	Взлет	Полет	Посадка
1	Самолеты с горизонтальным положением фюзеляжа на взлете и посадке	+0.5 (1.6)	+0.5 (0.25)	+1 (1.2)
2	Самолеты с вертикальным положением фюзеляжа на взлете и посадке	+1 (1.3)	+1 (0.25)	-1 (0.9)
3	Самолеты с вертикальным положением фюзеляжа на взлете и горизонтальным на посадке	+1 (1.3)	+1 (0.25)	+1 (1.2)

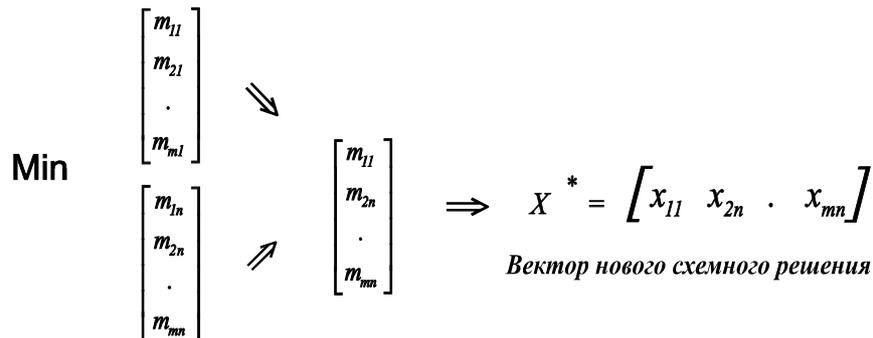


Рис. 7. Схема формирования вектора схемных решений, характеризующего новую схему самолета

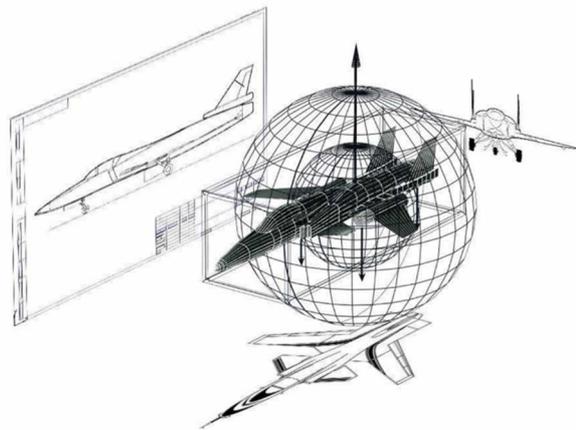


Рис.8. Твердотельная модель геометрического облика СВВП в пространстве инфраструктурных ограничений

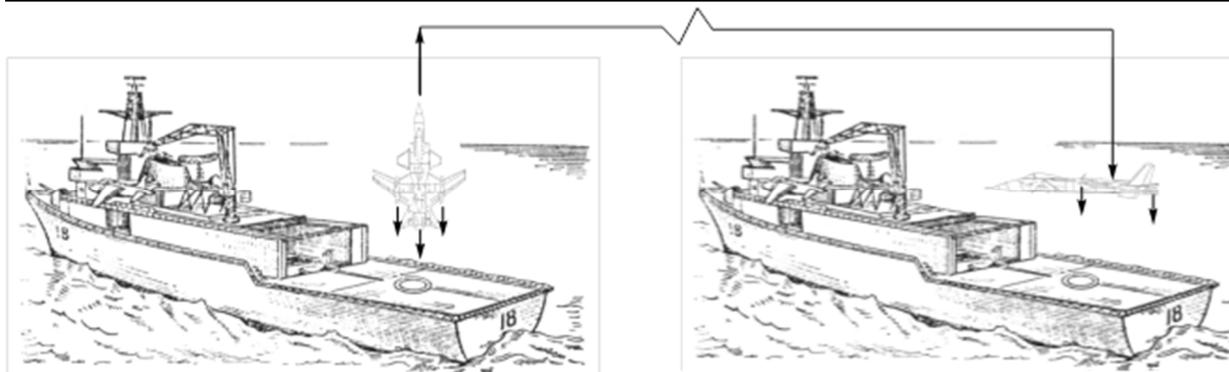


Рис. 9. Графическое представление концепции легкого СВВП с палубным базированием обеспечивающим вертикальное положение самолета при взлете и горизонтальное на посадке

На базе этого схемного решения был предложен СВВП оборудованный единой однодвигательной силовой установкой с двумя двухкамерными выносными форсажными камерами, расположенными в К-образном сочленении крыла обратной стреловидности. Самолёт выполнен по аэродинамической балансировочной схеме «утка» с двух килевым вертикальным оперением [2-3,7]. Устойчивость и управляемость во всех трех каналах обеспечивает газодинамическая модуляция тяги двигателя и поворотных сопловые аппараты. Размерность самолета определена из габаритов стандартного морского контейнера 45''НС и внутреннего в нем базирования СВВП и составила 15 тонн (рис.8). Что позволило иметь во внутренних отсеках вооружения целевую нагрузку 2 тонны, что соответствует четырем ракетам класса воздух-воздух среднего радиуса действия. Проект выполнен в Московском авиационном институте в 90-е годы аспирантом А.В.Проданом.

Многообразие схем говорит, что поиск схем еще не закончился. Новые технологии в материаловедении, двигателестроении, самолетостроении и т.д. позволят сделать шаг вперед к решению задач вертикального взлета и посадки.

Список литературы

1. Авторское свидетельство. SU 1766781 A1 (СССР) В 64 С 29/00. Самолет вертикального-ультракороткого взлета и посадки. Куприков М.Ю., Орестов И.А. Оpubл. в бюл. №37, 1992. 6 с.
2. Авторское свидетельство. SU 1816717 A1 (СНГ) В 64 С 29/00. Самолет вертикального-ультракороткого взлета и посадки. Куприков М.Ю., Продан А.В. Оpubл. в бюл. №19, 1993. 4 с.
3. Авторское свидетельство. SU 1821421 A1 (СНГ) В 64 С 29/04. Самолет вертикального взлета и посадки. Куприков М.Ю. Оpubл. в бюл. №22, 1993. 4 с.

4. Егер С.М., Матвеев А.М., Шаталов И.А. Основы авиационной техники. М.: Изд-во МАИ, 1999. 576 с.
5. Егер С.М., Лисейцев Н.К. и др. Проектирование самолетов. М.: Машиностроение, 1983. 616 с.
6. Жизненный цикл и реализация летательного аппарата Б.В. Бойцов, В.Д. Борисов, Н.М. Киселев, В.Г. Подколзин. М.: Изд-во МАИ, 2005. 520 с.
7. Kuprikov M., Maximov S. Selecting Rational Parameters For The Lift System Of A Subsonic Transport Plane, Ac Tch -96-24, Russian Sci-tech, №1 1997 Science@Technology, New-York, USA. S. 20.
8. Тищенко М.Н. Выбор параметров вертолета на начальной стадии проектирования: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. 124 с.

Куприков Михаил Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, зав. каф., kuprikov@russianpolar.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),

Рабинский Лев Наумович, д-р физ.-мат. наук, профессор, декан, f9_dec@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

STRUCTURAL-PARAMETRIC ANALYSIS AND SYNTHESIS OF AIRCRAFT AND LANDING AIRPLANE PERFORMANCE

M.Yu. Kuprikov, L.N. Rabinsky

An analysis of the influence of infrastructures on the choice of alternative variants of power plants for vertical takeoff and landing aircraft is given. The algorithm for obtaining a combined scheme of a power plant is considered as a resolution of the contradiction between a single and composite schemes of a power plant for vertical takeoff and landing aircraft. The method of arranging the aircraft from the virtual center of mass is given, which allows to obtain the layout of the aircraft from the conditions of infrastructural restrictions on the deck of the aircraft carrying cruiser. A method for the synthesis of new airplane circuit design is proposed. A graphic representation of the concept of a light maneuverable airplane with deck-based support providing a vertical position of the self-fly during take-off and horizontal landing is given.

Key words: aircraft, power plant, circuits, vertical take-off, geometry, layout, appearance, infrastructure, aircraft carriers.

Kuprikov Mikhail Yuryevich, doctor of technical sciences, professor, kuprikov@russianpolar.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation Institute (national research University),

Rabinskiy Lev Naumovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, dean of faculty, f9_dec@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

МЕТОД УЧЁТА НАЗЕМНЫХ РАЗРЫВОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИСТАНЦИОННЫХ СТРЕЛЬБ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕИВАНИЯ

Д.В. Искоркин

Разработан метод обработки результатов дистанционных стрельб по определению характеристик рассеивания артиллерийских и реактивных снарядов в трехмерной постановке. Отдельно рассмотрен случай получения наземных разрывов

Ключевые слова: рассеивание снарядов, эллипсоид рассеивания, обработка результатов стрельб.

Одной из важных практических задач, возникающих при составлении таблиц стрельбы ствольной и наземной артиллерии, является задача обработки результатов экспериментальных стрельб по определению характеристик рассеивания. Как правило, данные стрельбы проводятся попутно с другими видами стрельб, например, с ударными стрельбами по местности или дистанционными стрельбами, но могут проводиться и отдельно.

При стрельбе снарядами с ударным взрывателем техническое рассеивание характеризуется законом распределения системы двух случайных величин: абсциссы и ординаты точки разрыва на некоторой горизонтальной или вертикальной плоскости реальной или воображаемой (рис. 1).

При дистанционной стрельбе рассеивание носит пространственный характер и описывается законом распределения системы трех случайных величин координат точек разрыва снаряда. Данный закон является исчерпывающей характеристикой системы случайных величин и определяется тремя математическими ожиданиями, а также корреляционной матрицей с тремя дисперсиями и тремя различными моментами связи или коэффициентами корреляции [1-3].

Порядок обработки ударных стрельб по местности достаточно хорошо изучен и широко освещен в технической литературе [2-5], а дистанционные стрельбы незаслуженно обойдены вниманием исследователей.

Общий порядок обработки результатов дистанционных стрельб

Пусть произведено ℓ независимых выстрелов и зарегистрированы координаты разрывов:

$$(X_{g1}; Y_{g1}; Z_{g1}); (X_{g2}; Y_{g2}; Z_{g2}); \dots; (X_{g\ell}; Y_{g\ell}; Z_{g\ell}).$$

Рассмотрим порядок обработки результатов дистанционных стрельб для самого общего случая, когда направления главных осей эллипсоида рассеивания заранее неизвестны (рис. 1б). С этим эллипсоидом свяжем прямоугольную систему координат $OX_{g0}Y_{g0}Z_{g0}$, а в качестве опорной выберем нормальную систему координат $OX_gY_gZ_g$. Будем считать, что засечка координат разрывов производится в земной системе координат, а па-

параметры трёхосного эллипсоида рассеивания требуется найти в системе $OX_{g0}Y_{g0}Z_{g0}$. Система координат, связанная с эллипсоидом рассеивания $OX_{g0}Y_{g0}Z_{g0}$, занимает своё положение относительно нормальной системы путём трёх последовательных поворотов. Первый поворот производится против хода часовой стрелки вокруг второй оси на угол Ψ , второй поворот – вокруг третьей оси против хода часовой стрелки на угол Θ , третий поворот – вокруг первой оси против хода часовой стрелки на угол γ . В этих условиях справедливы следующие зависимости преобразования координат

$$\begin{pmatrix} X_{g0} \\ Y_{g0} \\ Z_{g0} \end{pmatrix} = C_1(\gamma)C_3(\Theta)C_2(\Psi) \begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Psi & 0 & -\sin \Psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Psi & 0 & \cos \Psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{pmatrix}, \quad (1)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} X_{g0} &= X_g \cos \Theta \cos \Psi + Y_g \sin \Theta - Z_g \cos \Theta \sin \Psi; \\ Y_{g0} &= X_g (\sin \gamma \sin \Psi - \cos \gamma \sin \Theta \cos \Psi) + Y_g \cos \Theta \cos \gamma + \\ &\quad + Z_g (\sin \gamma \cos \Psi + \cos \gamma \sin \Theta \sin \Psi); \\ Z_{g0} &= X_g (\cos \gamma \sin \Psi + \sin \gamma \sin \Theta \cos \Psi) - Y_g \cos \Theta \sin \gamma + \\ &\quad + Z_g (\cos \gamma \cos \Psi - \sin \gamma \sin \Theta \sin \Psi). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

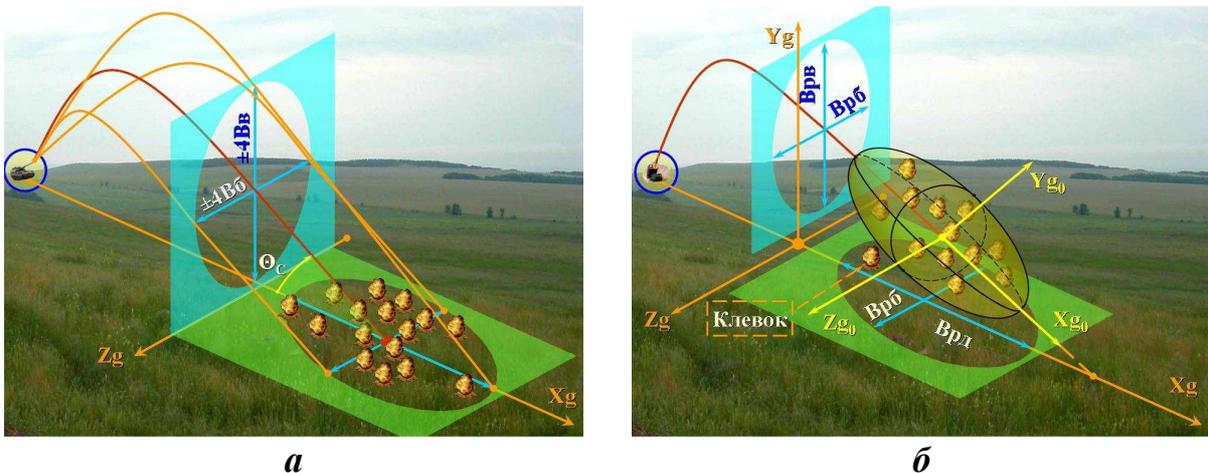


Рис. 1. Рассеивание снарядов при ударной стрельбе по местности (а) и дистанционной стрельбе (б)

Переходя к центрированным случайным величинам и считая $M[X_{g0}] = M[Y_{g0}] = 0$, находят момент связи величин X_{g0} и Y_{g0} , исходя из его определения

$$\begin{aligned} K[X_{g0}Y_{g0}] &= M[X_{g0}Y_{g0}] = M\{ [X_g \cos \Theta \cos \Psi + Y_g \sin \Theta - \\ &\quad - Z_g \cos \Theta \sin \Psi] \times \\ &\times [X_g (\sin \gamma \sin \Psi - \cos \gamma \sin \Theta \cos \Psi) + Y_g \cos \Theta \cos \gamma + \\ &\quad + Z_g (\sin \gamma \cos \Psi + \cos \gamma \sin \Theta \sin \Psi)] \}. \end{aligned} \quad (3)$$

Раскрывая скобки и применяя теорему о математическом ожидании линейной функции к выражению (3), получают следующую зависимость

$$\begin{aligned}
 K[X_{g0}Y_{g0}] &= M[X_{g0}Y_{g0}] = \\
 &= M\{[X_g^2 \cos \Theta \cos \Psi (\sin \gamma \sin \Psi - \cos \gamma \sin \Theta \cos \Psi) + \\
 &\quad + Y_g^2 \sin \Theta \cos \Theta \cos \gamma - \\
 &\quad - Z_g^2 \cos \Theta [\sin \gamma \cos \Psi \sin \Psi - \cos \gamma \cos^2 \Psi \sin \Theta + \cos \gamma \sin \Theta] + \\
 &\quad + X_g Y_g [2 \cos \gamma \cos \Psi \cos^2 \Theta - \cos \gamma \cos \Psi + \sin \gamma \sin \Psi \sin \Theta] + \\
 &\quad + X_g Z_g \cos \Theta [2 \sin \gamma \cos^2 \Psi + \cos \gamma \sin 2\Psi \sin \Theta - \sin \gamma] + \\
 &\quad + Y_g Z_g [\cos \gamma \sin \Psi - 2 \cos \gamma \sin \Psi \cos^2 \Theta + \sin \gamma \cos \Psi \sin \Theta]\}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Выполняя аналогичные преобразования для двух других моментов связи, можно записать

$$\begin{aligned}
 K[X_{g0}Z_{g0}] &= M[X_{g0}Z_{g0}] = M\{[X_g \cos \Theta \cos \Psi + Y_g \sin \Theta - Z_g \cos \Theta \sin \Psi] \times \\
 &\quad \times [X_g (\cos \gamma \sin \Psi + \sin \gamma \sin \Theta \cos \Psi) - Y_g \cos \Theta \sin \gamma + \\
 &\quad + Z_g (\cos \gamma \cos \Psi - \sin \gamma \sin \Theta \sin \Psi)]\},
 \end{aligned} \tag{5}$$

откуда

$$\begin{aligned}
 K[X_{g0}Z_{g0}] &= M[X_{g0}Z_{g0}] = \\
 &= M\{[X_g^2 \cos \Theta \cos \Psi (\cos \gamma \sin \Psi + \sin \gamma \sin \Theta \cos \Psi) - \\
 &\quad - Y_g^2 \sin \Theta \cos \Theta \sin \gamma - \\
 &\quad - Z_g^2 \cos \Theta [\cos \gamma \cos \Psi \sin \Psi + \sin \gamma \cos^2 \Psi \sin \Theta - \sin \gamma \sin \Theta] + \\
 &\quad + X_g Y_g [-2 \sin \gamma \cos \Psi \cos^2 \Theta + \sin \gamma \cos \Psi + \cos \gamma \sin \Psi \sin \Theta] - \\
 &\quad - X_g Z_g \cos \Theta [-2 \cos \gamma \cos^2 \Psi + \sin \gamma \sin 2\Psi \sin \Theta + \cos \gamma] + \\
 &\quad + Y_g Z_g [-\sin \gamma \sin \Psi + 2 \sin \gamma \sin \Psi \cos^2 \Theta + \cos \gamma \cos \Psi \sin \Theta]\}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Для момента связи $K[Y_{g0}Z_{g0}]$ справедливо следующее равенство

$$\begin{aligned}
 K[Y_{g0}Z_{g0}] &= M[Y_{g0}Z_{g0}] = M\{[X_g (\sin \gamma \sin \Psi - \cos \gamma \sin \Theta \cos \Psi) + \\
 &\quad + Y_g \cos \Theta \cos \gamma + Z_g (\sin \gamma \cos \Psi + \cos \gamma \sin \Theta \sin \Psi)] \times \\
 &\quad \times [X_g (\cos \gamma \sin \Psi + \sin \gamma \sin \Theta \cos \Psi) - Y_g \cos \Theta \sin \gamma + \\
 &\quad + Z_g (\cos \gamma \cos \Psi - \sin \gamma \sin \Theta \sin \Psi)]\},
 \end{aligned} \tag{7}$$

откуда

$$\begin{aligned}
 K[Y_{g0}Z_{g0}] &= M[Y_{g0}Z_{g0}] = \\
 &= M\{1/2 X_g^2 (-\sin 2\Psi \sin \Theta \cos 2\gamma + \sin 2\gamma \sin^2 \Psi - \sin 2\gamma \cos^2 \Psi \sin^2 \Theta) - \\
 &\quad - 1/2 Y_g^2 \cos^2 \Theta \sin 2\gamma + \\
 &\quad + 1/2 Z_g^2 (\cos 2\gamma \sin \Theta \sin 2\Psi + \sin 2\gamma \cos^2 \Psi - \sin 2\gamma \sin^2 \Psi \sin^2 \Theta) + \\
 &\quad + X_g Y_g (\cos \Theta \cos 2\gamma \sin \Psi + 1/2 \sin 2\gamma \cos \Psi \sin 2\Theta) - \\
 &\quad - X_g Z_g (\cos 2\gamma \sin \Theta \cos 2\Psi - 1/2 \sin 2\gamma \sin 2\Psi - 1/2 \sin 2\Psi \sin 2\gamma \sin^2 \Theta) + \\
 &\quad + Y_g Z_g (\cos \Theta \cos 2\gamma \cos \Psi - 1/2 \sin 2\gamma \sin \Psi \sin 2\Theta)\}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Учитывая, что для центрированных случайных величин и их систем справедливы соотношения

$$\begin{aligned}
 M[X_g^2] &= D[X_g], \quad M[Y_g^2] = D[Y_g], \quad M[Z_g^2] = D[Z_g], \\
 M[X_g Y_g] &= K[X_g Y_g], \quad M[X_g Z_g] = K[X_g Z_g], \quad M[Y_g Z_g] = K[Y_g Z_g]
 \end{aligned} \tag{9}$$

и приравнявая каждый момент связи нулю, получают систему трёх уравнений, состоящую из выражений (4), (6), (8), с тремя неизвестными углами Ψ , Θ и γ

$$K[X_{g0}Y_{g0}] = 0; \quad K[X_{g0}Z_{g0}] = 0; \quad K[Y_{g0}Z_{g0}] = 0. \tag{10}$$

Непосредственно выразить искомые величины Ψ , Θ и γ из системы (10) не удаётся по причине их громоздкости и относительной сложности, однако поиск их численным методом не вызывает вычислительных трудностей.

Найдём оценки главных срединных отклонений $E[X_{g0}]$, $E[Y_{g0}]$, $E[Z_{g0}]$. Для этого запишем дисперсии величин X_{g0} , Y_{g0} и Z_{g0} , заданных зависимостями (2), на основании теоремы о дисперсии линейной функции независимых случайных величин [1, 3]

$$\left. \begin{aligned} D[X_{g0}] &= D[X_g] \cos^2 \Theta \cos^2 \Psi + D[Y_g] \sin^2 \Theta - D[Z_g] \cos^2 \Theta \sin^2 \Psi + \\ &+ K[X_g Y_g] \sin 2\Theta \cos \Psi - K[X_g Z_g] \cos^2 \Theta \sin 2\Psi - K[Y_g Z_g] \cos 2\Theta \sin \Psi; \\ D[Y_{g0}] &= D[X_g] (\sin \gamma \sin \Psi - \cos \gamma \sin \Theta \cos \Psi)^2 + D[Y_g] \cos^2 \Theta \cos^2 \gamma + \\ &+ D[Z_g] (\sin \gamma \cos \Psi + \cos \gamma \sin \Theta \sin \Psi)^2 + \\ &+ 2K[X_g Y_g] \cos \Theta \cos \gamma (\sin \gamma \sin \Psi - \cos \gamma \sin \Theta \cos \Psi) + \\ &+ K[X_g Z_g] (\sin^2 \gamma \sin 2\Psi - \sin 2\gamma \sin \Theta \cos 2\Psi - \cos^2 \gamma \sin^2 \Theta \sin 2\Psi) + \\ &+ 2K[Y_g Z_g] \cos \Theta \cos \gamma (\sin \gamma \cos \Psi + \cos \gamma \sin \Theta \sin \Psi); \\ D[Z_{g0}] &= D[X_g] (\cos \gamma \sin \Psi + \sin \gamma \sin \Theta \cos \Psi)^2 + D[Y_g] \cos^2 \Theta \sin^2 \gamma + \\ &+ D[Z_g] (\cos \gamma \cos \Psi - \sin \gamma \sin \Theta \sin \Psi)^2 - \\ &- 2K[X_g Y_g] \cos \Theta \sin \gamma (\cos \gamma \sin \Psi + \sin \gamma \sin \Theta \cos \Psi) + \\ &+ K[X_g Z_g] (\cos^2 \gamma \sin 2\Psi - \sin 2\gamma \sin \Theta \cos 2\Psi - \sin^2 \gamma \sin^2 \Theta \sin 2\Psi) - \\ &- 2K[Y_g Z_g] \cos \Theta \sin \gamma (\cos \gamma \cos \Psi - \sin \gamma \sin \Theta \sin \Psi). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Таким образом, окончательно оценки главных срединных отклонений при дистанционной стрельбе определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} Bp\partial &= E[X_{g0}] = M_k \rho \sqrt{2} \sqrt{D[X_{g0}]} ; \\ Bp\vartheta &= E[Y_{g0}] = M_k \rho \sqrt{2} \sqrt{D[Y_{g0}]} ; \\ Bp\bar{\delta} &= E[Z_{g0}] = M_k \rho \sqrt{2} \sqrt{D[Z_{g0}]} , \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\rho = 0,47694$ – константа; $M_k \approx \{1 - 1/[2(n-1)]\}^{-1/2}$ – «центрирующий» коэффициент.

Альтернативным методом расчёта величин дисперсий $D[X_{g0}]$, $D[Y_{g0}]$, $D[Z_{g0}]$ и моментов связи $K[X_{g0}Y_{g0}]$, $K[X_{g0}Z_{g0}]$, $K[Y_{g0}Z_{g0}]$ является прямое вычисление в соответствии с их определениями по зависимостям

$$\left. \begin{aligned} D[K_{g0}] &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_{g0i} - m_{K_{g0}})^2 ; \\ K[K1_{g0}K2_{g0}] &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K1_{g0i} - m_{K1_{g0}})(K2_{g0i} - m_{K2_{g0}}) , \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $m_{K_{g0}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{g0i}$ – среднее значение координаты $K_{g0} = \{X_{g0}, Y_{g0}, Z_{g0}\}$ полученное в результате преобразований (2).

Каноническое уравнение единичного трёхосного эллипсоида рассеивания в системе координат $OX_{g0}Y_{g0}Z_{g0}$ имеет вид [7]

$$X_{g0}^2/Vp\varrho^2+Y_{g0}^2/Vp\epsilon^2+Z_{g0}^2/Vp\sigma^2=1. \quad (14)$$

На основе полученного канонического уравнения (14), учитывая зависимости (2), уравнение эллипсоида рассеивания в земной системе координат $OX_gY_gZ_g$ можно записать в виде

$$\begin{aligned} & [(X_g-m_{Xg})\cos\Theta\cos\Psi+(Y_g-m_{Yg})\sin\Theta-(Z_g-m_{Zg})\cos\Theta\sin\Psi]^2/Vp\varrho^2+ \\ & +[(X_g-m_{Xg})(\sin\gamma\sin\Psi-\cos\gamma\sin\Theta\cos\Psi)+(Y_g-m_{Yg})\cos\Theta\cos\gamma+ \\ & \quad +(Z_g-m_{Zg})(\sin\gamma\cos\Psi+\cos\gamma\sin\Theta\sin\Psi)]^2/Vp\epsilon^2+ \\ & +[(X_g-m_{Xg})(\cos\gamma\sin\Psi+\sin\gamma\sin\Theta\cos\Psi)-(Y_g-m_{Yg})\cos\Theta\sin\gamma+ \\ & \quad +(Z_g-m_{Zg})(\cos\gamma\cos\Psi-\sin\gamma\sin\Theta\sin\Psi)]^2/Vp\sigma^2=1. \end{aligned} \quad (15)$$

Данное уравнение позволяет определять характеристики рассеивания в различных плоскостях и в любых на направлениях. Опыт вычислений показывает, что характеристики рассеивания, вычисленные в системах координат $OX_{g0}Y_{g0}Z_{g0}$ и $OX_gY_gZ_g$, могут различаться на несколько десятков процентов, в объёмы эллипсоидов – более чем наполовину. На рис. 2 показаны эллипсоиды рассеивания в нормальной системе координат и в системе, связанной с эллипсоидом.

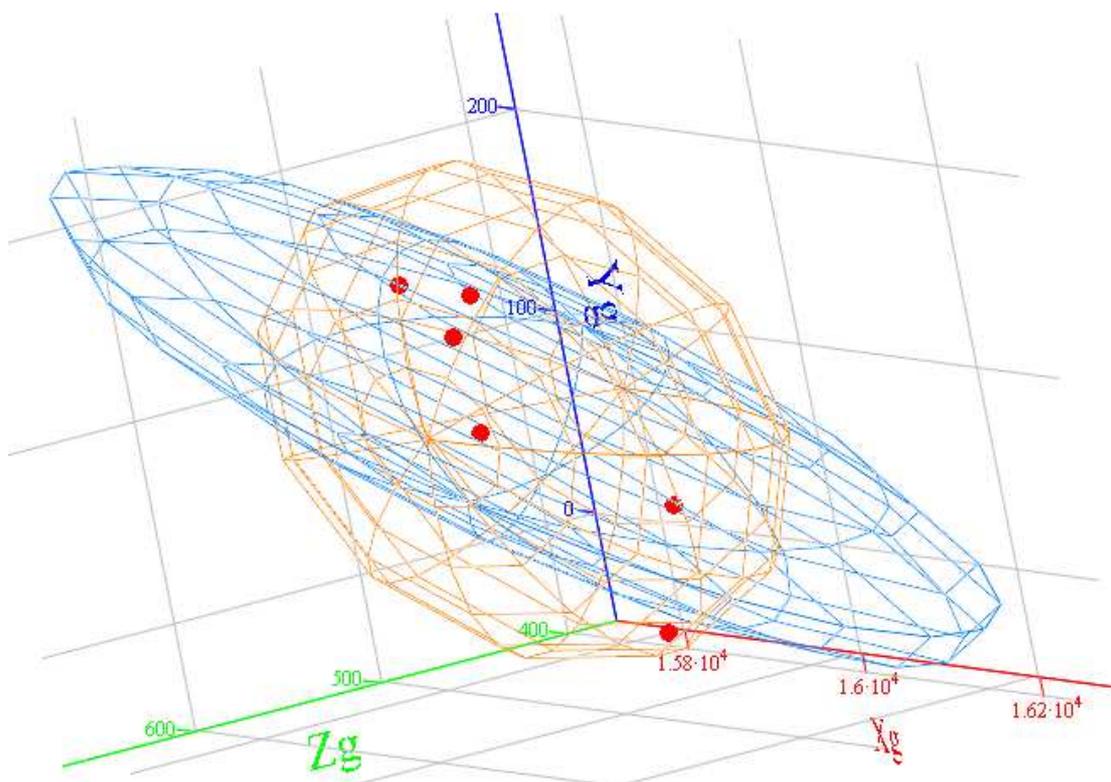


Рис. 2. Эллипсоиды рассеивания

Метод обработки результатов дистанционных стрельб при наличии в группе наземных разрывов

С целью исключения при дистанционной стрельбе разрывов снарядов при ударе о грунт установку уровня необходимо назначать с учётом априорной информации о характеристике рассеивания в точке разрыва по

высоте $V_{рв}$. Для этого исчисленную установку уровня необходимо увеличить на величину $\varepsilon \approx 4 V_{рв} \cdot 955 / D_T$. Однако это обстоятельство не гарантирует получение всех воздушных разрывов. Дальнейшее увеличение высоты разрыва нежелательно, т.к. в таблицах стрельбы характеристики рассеивания помещают при положении центра рассеивания снаряда (ЦРС) на горизонте орудия. Наземные разрывы, называемые «клевками», практически не добавляют информации о положении центра рассеивания снарядов и характеристиках рассеивания и лишь косвенно могут подтвердить гипотезу о найденном положении центра рассеивания снарядов по высоте. Однако при получении наземного разрыва желательно все же использовать информацию о нём для обработки, а не отбрасывать его как несчётный. Такой подход приводит к повышению расхода снарядов без увеличения точности результата. Рассмотрим метод обработки результатов дистанционных стрельб по определению характеристик рассеивания при получении в группе наземных разрывов. Пусть в счётной группе выстрелов n снарядов разорвались в воздухе, а m – на поверхности Земли. Очевидно, что верхний предел положения ЦРС, характеризующий среднее всех разрывов (и воздушных, и наземных), будет определяться точкой ЦРС_В, которая характеризует среднее значение только воздушных разрывов (рис. 3). При отсутствии в группе наземных разрывов ЦРС и ЦРС_В совпадают. В дальнейшем будем считать, что случайная величина ординаты всех возможных разрывов y_1 подчиняется нормальному закону распределения, а ордината только воздушных разрывов y_g – усеченному нормальному закону распределения, функция плотности вероятности которого имеет вид [1]

$$f_{UN}(y_g) = c \frac{\rho}{\sqrt{\pi} E_{y1}} e^{-\rho^2 \frac{(y_g - m_{y1})^2}{E_{y1}^2}}, \quad (16)$$

где y_1 – случайная величина ординаты разрыва, распределенная по нормальному закону с математическим ожиданием m_{y1} и средним отклонением E_{y1} ; c – постоянная величина, определяемая выражением

$$c = \frac{1}{F\left(\frac{\beta - m_{y1}}{E_{y1}}\right) - F\left(\frac{\alpha - m_{y1}}{E_{y1}}\right)}; \quad (17)$$

α, β – нижняя и верхняя границы усеченного нормального распределения. В условиях решаемой задачи $\alpha=0, \beta=\infty$; $F(x)$ – функция распределения нормального закона.

Чем выше ЦРС от поверхности Земли, тем менее различаются между собой функции плотности нормального распределения $f_N(y_1)$ и усеченного нормального распределения $f_{UN}(y_g)$ и тем ближе к нему центр рассеивания воздушных разрывов ЦРС_В. В силу близости функций распределения нормальной случайной величины y_1 и усеченной нормальной случайной величины высоты воздушных разрывов y_g , а также вследствие отсут-

ствия развитого статистического аппарата и табулированных функций для усеченного нормального распределения в дальнейшем будем считать случайную величину Y_g распределенной по нормальному закону.

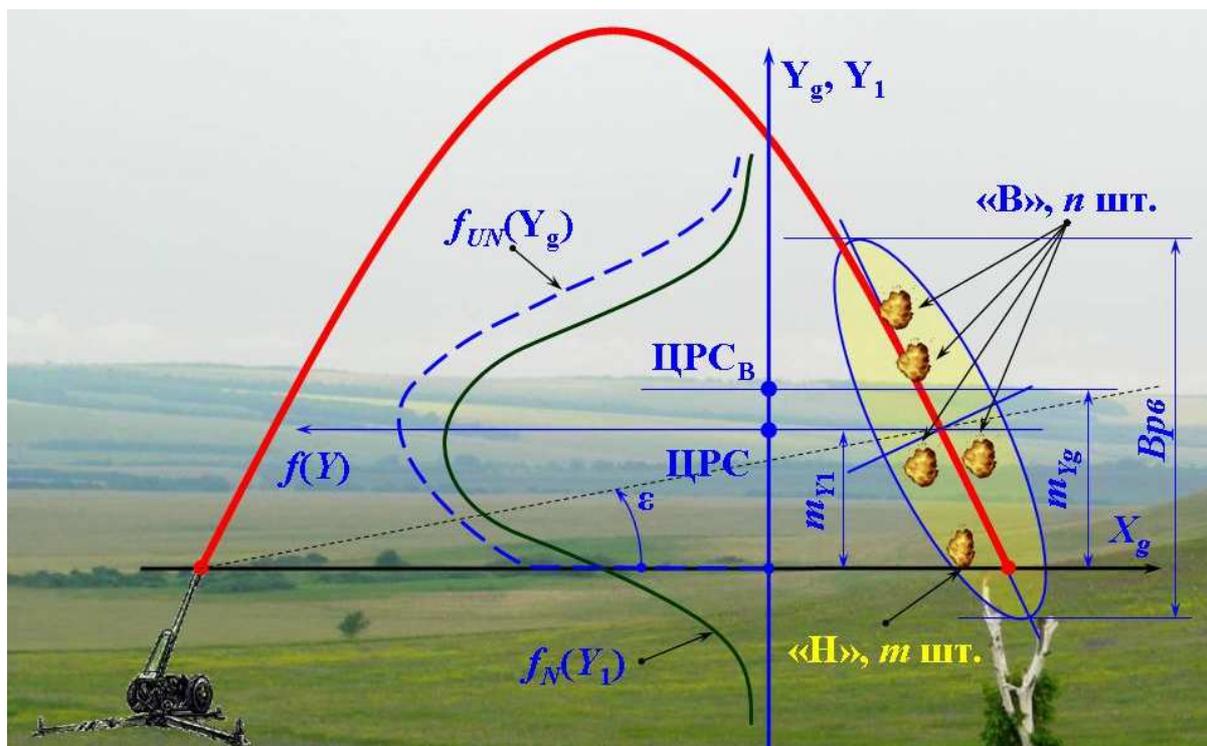


Рис. 3. Эллипсоид рассеивания и его характеристики

Основной задачей обработки результатов дистанционных стрельб является отыскание ординаты ЦРС и её дисперсии ($m_{y1}; \sigma_{y1}^2$). При отсутствии в группе наземных разрывов это положение необходимо определять как среднее арифметическое ординат засеченных разрывов. При получении наземных разрывов алгоритм обработки результатов требует дополнительных вычислений.

Положение ЦРС_В и его дисперсия могут быть найдены по значениям ординат засечённых воздушных разрывов

$$\left. \begin{aligned} m_{y_g} &= \sum_{i=1}^n y_{g i}; \\ S_2^2[y_g] &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{g i} - m_{y_g})^2. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Из теории вероятности известно, что математическое ожидание и дисперсия случайной величины, распределенной по усеченному нормальному распределению, определяются следующими выражениями [1]

$$m_{yg} = f_m(m_{y1}; \sigma_{y1}) = m_{y1} + \sigma_{y1} \lambda, \quad (19)$$

где $\lambda = \frac{1}{\rho\sqrt{2}} \cdot \frac{\Phi_T\left(\frac{\alpha - m_{y1}}{E_{y1}}\right) - \Phi_T\left(\frac{\beta - m_{y1}}{E_{y1}}\right)}{F\left(\frac{\beta - m_{y1}}{E_{y1}}\right) - F\left(\frac{\alpha - m_{y1}}{E_{y1}}\right)}$ – параметр; $\Phi_T(x)$ – табулированная

функция нормального распределения [1, 5]; $E_{y1} = \rho\sigma_{y1}\sqrt{2}$ – среднее отклонение;

$$D_{yg} = f_D(m_{y1}; \sigma_{y1}) = \sigma_{y1}^2 \left\{ (1 - \lambda)^2 + c \left[\left(\frac{\alpha - m_{y1}}{E_{y1}} \right) \Phi_T \left(\frac{\alpha - m_{y1}}{E_{y1}} \right) - \left(\frac{\beta - m_{y1}}{E_{y1}} \right) \Phi_T \left(\frac{\beta - m_{y1}}{E_{y1}} \right) \right] \right\}. \quad (20)$$

Зависимости (19) и (20) позволяют определять характеристики усеченного нормального распределения по известным характеристикам соответствующего нормального распределения. Таким образом, решаемая задача сводится к поиску корней системы двух трансцендентных уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} f_m(m_{y1}; \sigma_{y1}) &= m_{yg}; \\ f_D(m_{y1}; \sigma_{y1}) &= S^2_2[y_g]. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

В правой части полученной системы уравнений находятся величины, определенные из опытных стрельб по зависимостям (18), а в левой – их аналитические выражения. Решением системы (21) являются математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение $(m_{y1}; \sigma_{y1})$ нормального распределения. По причине относительной сложности функций (19), (20) найти из них конечные аналитические зависимости, являющиеся решением системы (21), не представляется возможным. При этом численные методы решения системы (21) не вызывают каких-либо вычислительных трудностей.

В общем виде выражения $f^{-1}_m(m_{yg}; \sigma_{yg})$ и $f^{-1}_D(m_{yg}; \sigma_{yg})$ позволяют по результатам засечки воздушных разрывов найти неизвестные величины положения ЦРС и его дисперсию $(m_{y1}; \sigma_{y1})$. При этом наличие в счётной группе наземных разрывов в таком алгоритме никак не учитывается. Существующие в настоящее время методики не предполагают их использование, что равносильно классификации их как несчетных. Для использования информации о таких разрывах при обработке результатов стрельб необходимо учитывать то обстоятельство, что найденные величины $(m_{y1}; \sigma_{y1})$ являются случайными. Из математической статистики известно [5], что случайная величина

$$T = \sqrt{n} \frac{\bar{Y}_g - y_{g0}}{S_2} \quad (22)$$

распределена по закону Стьюдента, функция плотности вероятности которой имеет вид

$$S(t, k) = \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi k} \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}}, \quad (23)$$

где $\Gamma(k)$ – гамма-функция; $k=n-1$ – число степеней свободы.

В этом случае область допустимых значений (ОДЗ_{Yg}) положения ЦРС_B при двухсторонней доверительной вероятности α будет определяться следующими выражениями

$$C_{1m} = m_{yg} - t_p S_2 / \sqrt{n}; \quad C_{2m} = m_{yg} + t_p S_2 / \sqrt{n}, \quad (24)$$

где $t_p = S^{-1}(k; \alpha/2)$ – критическое значение распределения Стьюдента.

Для дисперсии ординаты ЦРС_B область ОДЗ_{Yg} задаётся следующим образом

$$C_{1D} = \frac{(n-1)S_2^2}{\chi_2^2}; \quad C_{2D} = \frac{(n-1)S_2^2}{\chi_1^2}, \quad (25)$$

где χ_1^2, χ_2^2 – критические точки распределения χ^2 , определяемые расчётом или с помощью таблиц [2, 5] по числу степеней свободы $k=n-1$ и величинам $\gamma_1=(1+\alpha)/2, \gamma_2=(1-\alpha)/2$.

Таким образом, в системе координат $(m_{yg}; S_{yg})$ существует невырожденная ОДЗ_{Yg}, в которой с вероятностью α находятся ЦРС_B и его дисперсия (рис. 4).

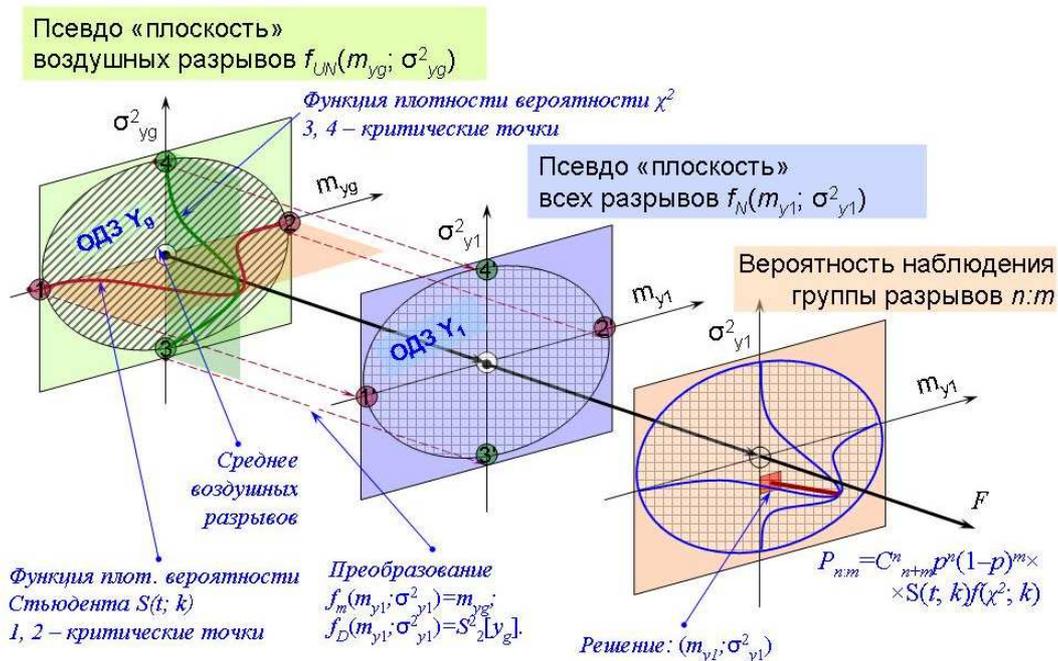


Рис. 4. Геометрическая сущность метода

Каждой точке этой области путём преобразований (21) можно поставить в соответствие пару чисел $(m_{y1}; \sigma_{y1}^2)$, которые характеризуют положение и рассеивание случайной величины Y_1 . Положение этих точек в

системе координат $(m_{y1}; \sigma_{y1}^2)$ будет определять новую ОДЗ_{у1}. Каждой точке этой области соответствует свое значение вероятности появления в серии выстрелов n воздушных и m наземных разрывов. Так, вероятность того, что при одном выстреле будет получен воздушный разрыв, определяется выражением

$$p = \frac{1}{2} \left[\Phi_E \left(\frac{\beta - m_{y1}}{E_{y1}} \right) - \Phi_E \left(\frac{\alpha - m_{y1}}{E_{y1}} \right) \right], \quad (26)$$

а получение серии из n воздушных и m наземных разрывов определяется формулой Бернулли

$$P_{n:m} = C_{n+m}^n p^n (1-p)^m, \quad (27)$$

где $C_{n+m}^n = (n+m)! / (n!m!)$ – число сочетаний n из общего числа $n+m$ разрывов.

Очевидно, что наиболее правдоподобными характеристиками искомого положения и рассеивания ЦРС $(m_{y1}; \sigma_{y1}^2)$ будут такие значения, которые обратят в максимум выражение (27). Данное выражение можно рассматривать как целевую функцию от искомым аргументов, т.е.

$$\text{ЦФ}_1: F_2 = P_{n:m}(m_{y1}; \sigma_{y1}^2) = C_{n+m}^n p^n (1-p)^m \rightarrow \max. \quad (28)$$

Если бы ранее удалось получить аналитические выражения для преобразований $f_{-1}^m(m_{yg}; \sigma_{yg})$ и $f_{-1}^D(m_{yg}; \sigma_{yg})$, определяемых выражением (21), то можно было бы искать $(m_{y1}; \sigma_{y1})$ в непрерывной ОДЗ. В условиях, когда указанного решения объективно не существует, полученную ОДЗ_{у1} целесообразно разбить на элементарные прямоугольники с размерами dm_{y1} и dS_{y1} , каждому из которых необходимо поставить в соответствие величину вероятности $P_{n:m}$. Тогда за решение поставленной задачи можно принять центр такого элементарного прямоугольника, которому соответствует наибольшее значение вероятности $P_{n:m}$. Это было бы справедливым в том случае, когда положение ЦРС в него ОДЗ было бы равновероятным. Так как функции плотности вероятности распределения Стьюдента $S(t, k)$ и χ^2 -распределения $f(\chi^2)$ отличаются от равномерного, то целесообразно за целевую функцию принять значение вероятности наблюдения серии воздушных и наземных разрывов в соотношении $n:m$ помноженному на значения указанных функций плотности вероятностей, вычисленных для середин элементарных прямоугольников со сторонами $dm_{y1} \times dS_{y1}$, т.е.

$$F = P_{n:m} S(t, k) f(\chi^2, k), \quad (29)$$

где $f(z, k) = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{k}{2}} e^{-\frac{z}{2}} z^{\frac{k}{2}-1}}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)}$ – функция плотности вероятности

χ^2 -распределения.

Исходя из принципа максимального правдоподобия значение данной целевой функции необходимо обратить в максимум, т.е.

$$\text{ЦФ}_2: F_2(m_{y1}; S_{y1}) = P_{n;m} S(t, k) f(\chi^2) \rightarrow \max. \quad (30)$$

Трёхмерный вид двух целевых функций F_1 и F_2 показан на рис. 5.

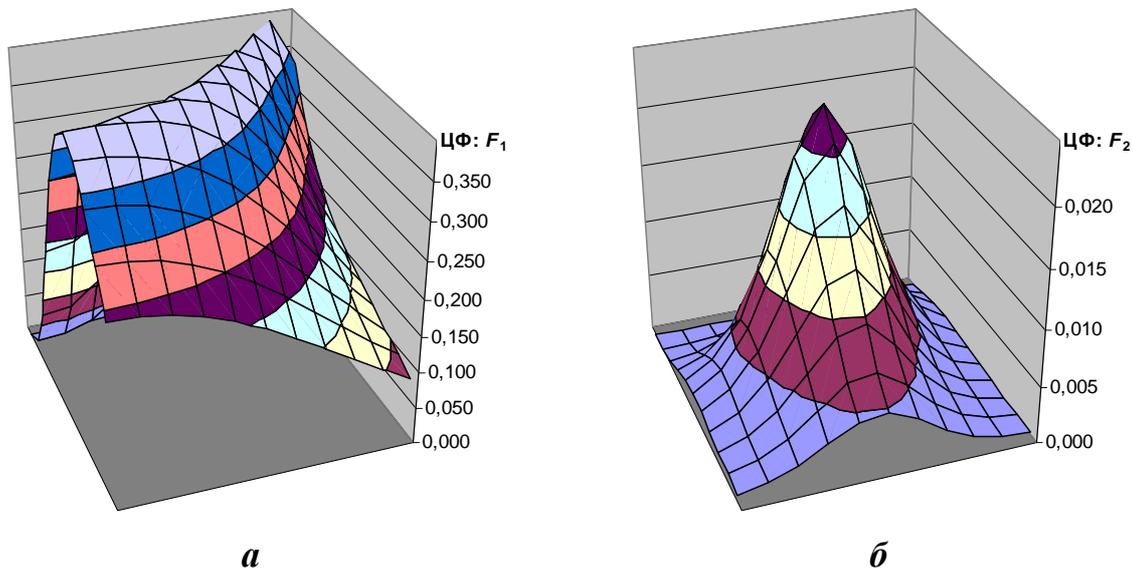


Рис. 5. Вид целевых функций правдоподобия:
а – без учёта веса; б – с учётом весовых функций

Сформулированная задача классифицируется как оптимизационная задача нелинейного дискретного программирования с нелинейными ограничениями (ОГР), которые определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \text{ОГР: } C_1 m_{[y_g]} = m_{y_g} - t_p S_2 / \sqrt{n} \leq y_g \leq C_2 m_{[y_g]} = m_{y_g} + t_p S_2 / \sqrt{n}; \\ C_3 D_{[y_g]} = \frac{(n-1)S_2^2}{\chi_2^2} \leq D[y_g] \leq C_4 D_{[y_g]} = \frac{(n-1)S_2^2}{\chi_1^2}. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Методы решения задач такого класса хорошо развиты и позволяют достаточно быстро находить искомое решение [7]. Геометрическое решение данной задачи показано на рис. 5б и соответствует точке с максимальной аппликатой.

Выводы

Таким образом, алгоритм обработки результатов дистанционных стрельб по определению характеристик рассеивания при наличии наземных разрывов в группе может быть следующим:

1. Задаются значением доверительной вероятности α .
2. По зависимостям (18) определяют среднее значение ординаты воздушных разрывов m_{y_g} и её дисперсию $S_2^2[y_g]$.
3. По зависимостям (31) находят границы ОДЗ $_{Y_g}$.
4. Решая систему уравнений (21) четыре раза находят четыре новых критических точки ОДЗ $_{Y1}$: $C_1 m_{[y1]}$, $C_2 m_{[y1]}$, $C_3 D_{[y1]}$, $C_4 D_{[y1]}$. При решении правые части уравнений (21) принимают следующими: $(C_1 m_{[y_g]}; S_2^2[y_g])$, $(C_2 m_{[y_g]}; S_2^2[y_g])$, $(m_{y_g}; C_3 D_{[y_g]})$, $(m_{y_g}; C_4 D_{[y_g]})$.

5. Полученную ОДЗ_{У1} разбивают на элементарные интервалы, в центре каждого из которых находят значение целевой функции F_2 по зависимости (30).

6. За окончательное решение принимают середину такого интервала ($m_{y1н}; \sigma_{y1н}^2$), принадлежащего ОДЗ_{У1}, в котором значение целевой функции максимально.

7. Вычисляют характеристику рассеивания разрывов по высоте

$$B_{рв} = \rho \sigma_{y1н} \sqrt{2}. \quad (32)$$

Основным допущением метода является гипотеза о близости функций усеченного нормального распределения и порождающей её функции нормального распределения. Данная гипотеза тем более правдоподобна, чем выше положение ЦРС от поверхности Земли и чем меньше срединное отклонение σ_{y1} . Это обстоятельство обуславливает и направления совершенствования метода, которое заключается в необходимости вывода функций распределения среднего значения и дисперсии случайной величины, распределенной по усеченному нормальному закону. Это позволит более корректно строить ОДЗ_{Уg} и более точно производить все последующие вычисления. Помимо этого с целью повышения точности вычислений можно директивно увеличить размеры ОДЗ_{Уg}, что практически будет эквивалентно повышению значения доверительной вероятности α .

Разработанный метод обработки результатов дистанционных стрельб и учёта наземных разрывов, до настоящего времени в практике Испытательных полигонов не применялся.

Список литературы

1. Шестаков А.В. Теория вероятностей. Пенза: ВАИУ, 1968. Ч. I. 224 с.
2. Левашов В.Ф., Шмельков В.Б., Шишов В.Ф. Теория вероятностей в применении к артиллерийской инженерной практике: учебное пособие. Пенза: АИИ, 2003. 244 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник. 9 изд. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 576 с.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения: учебное пособие. 3 изд. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 464 с.
5. Шестаков А.В., Быстрицкий Ю.К. Основы математической статистики. Пенза: ВАИУ, 1982. 89 с.
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Задачи и упражнения по теории вероятностей: учебное пособие. 5-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 440 с.
7. Образовательный математический сайт. [Электронный ресурс] URL: <http://www.exponenta.ru>. (дата обращения: 10.05.2018).

Искоркин Дмитрий Викторович, канд. техн. наук, доцент, докторант, antares.75@mail.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения

METHOD OF DESCRIPTION OF GROUND EXPLOSIONS DURING THE DISTANCE SHOOTING RESULTS PROCESSING IN DEFINING DISPERSION CHARACTERISTICS

D.V. Iskorkin

A method of the distance shooting results processing in defining artillery and reactive missiles dispersion characteristics was developed in 3D. Apart from that a case of the ground explosions was also analyzed.

Key words: dispersion of missiles, dispersion ellipsoid, shooting results processing.

Iskorkin Dmitry Viktorovich, candidate of technical science, docent, doctoral candidate, antares.75@mail.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of logistics

УДК 629.762; 533.696

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ОТДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

С.Ю. Пирогов, А.Ю. Карчин, Д.Г. Белянин, А.В. Апевалов

Рассматриваются подходы к определению аэродинамических характеристик элементов отделяемых частей ракет-носителей, образующихся в результате разрушения последних при движении в атмосфере. Это необходимо для повышения адекватности и точности модели прогнозирования районов падения отделяемых частей. Предложенная методика базируется на использовании точечных оценок аэродинамических коэффициентов в диапазоне различных чисел Маха и возможной ориентации элемента отделяемой части в пространстве. Использование такого подхода позволяет более точно рассчитывать время движения элемента ОЧ РН до падения, а также влияние ветра на эллипс рассеивания.

Ключевые слова: отделяемая часть, ракета-носитель, аэродинамические характеристики.

Особенности расположения отечественных космодромов, а также конфигурация трасс запусков космических аппаратов обусловили необходимость создания широкой сети районов падения (РП) отделяемых частей (ОЧ) ракет-носителей (РН). Непрерывное расширение хозяйственной деятельности, ужесточение экологических норм, а также требования по снижению затрат на эксплуатацию районов падения существенно усложняет задачу их эксплуатации. Кроме того, опыт эксплуатации районов падения показывает, что зачастую имеет место значительный рост размеров эллипсов рассеивания ОЧ РН по сравнению с характеристиками РП, представленными в баллистической документации на изделия и, соответственно,

выходы точек падения ОЧ РН за пределы выделенных РП для отработавшей второй ступени. И здесь точная и достоверная информация о точках падения ОЧ РН важна как никогда: для быстрой ликвидации экологического ущерба, идентификации фрагментов для разрешения спорных моментов с местной администрацией, а также для сокращения времени работы поисковых групп [1].

Уточнение информации возможно за счет расширения числа учитываемых в моделях возмущающих факторов, а также за счет построения более точных и адекватных моделей, которые учитывают дополнительный перечень физических явлений, сопровождающих движение отделяемой части в атмосфере, например, интенсивный аэродинамический нагрев, нестационарное движение, нестационарное нагружение корпуса ОЧ РН, а также ее разрушение [2, 3]. Исключение фактора разрушения из расчётных математических моделей описания движения РКН приводит к несоответствию расчётных характеристик районов падения реальным условиям пусков (рис. 1).

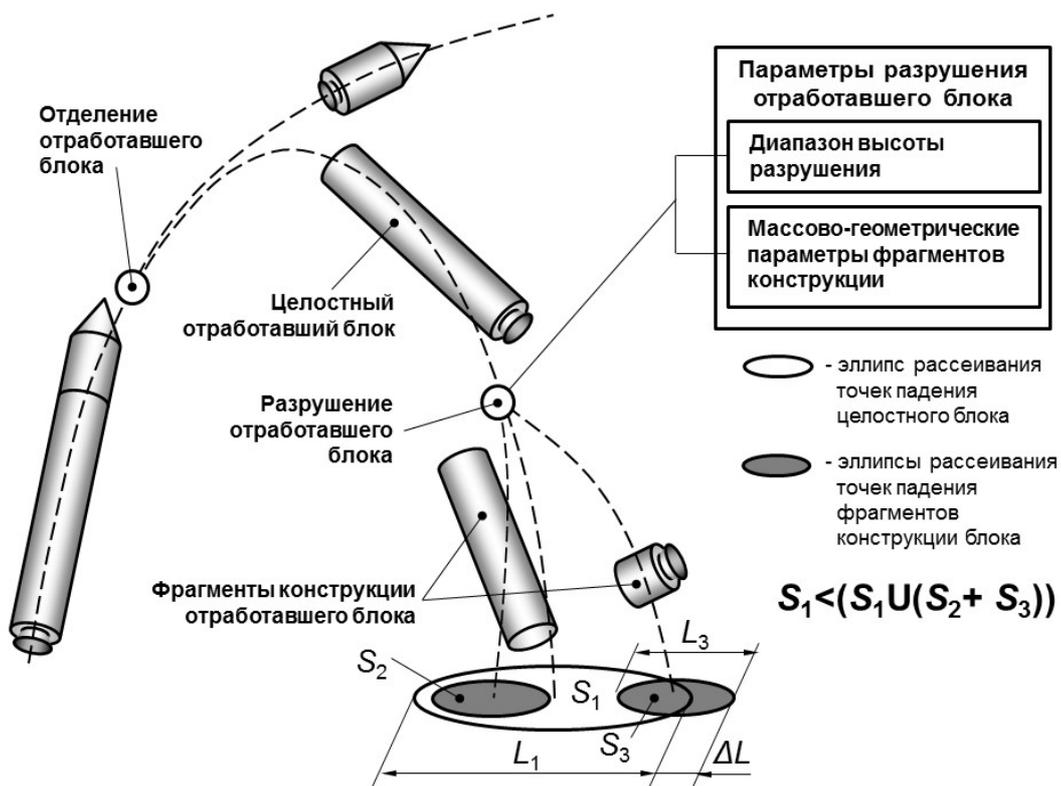


Рис. 1. Схема разрушения отработавшего ракетного блока

Ранее считалось, что основной причиной, приводящей к разрушению ОЧ РН, является аэродинамический нагрев обечайки корпуса. При этом не учитываются другие существенные факторы, оказывающие значительное влияние на нагружение корпуса ОЧ РН: действие сил, определяющих напряжённо-деформированное состояние корпуса ОЧ. Применение

моделей разрушения, учитывающих только аэродинамический нагрев обечайки корпуса ОЧ, не позволяет произвести расчёт высот, на которых может произойти разрушение корпуса ОЧ, а также прогнозировать массово-геометрические и аэродинамические характеристики фрагментов конструкции ОЧ РН. Тем самым возникает необходимость комплексного подхода, системного обоснования, выявления всего спектра условий разрушения ОЧ, оценки влияния разрушения на характеристики РП ОЧ и учёт его в моделях движения ОЧ РН [1].

Одним из важнейших элементов указанного комплексного подхода является задача определения аэродинамических характеристик как самой ОЧ РН, так и ее элементов, возникающих при разрушении. В данной публикации представлены материалы определения типовых элементов отделяемых частей для блока «А» РН типа «Союз».

Анализ формы типовых элементов ОЧ РН, найденных в районах падения, а также расчетных исследований по определению условий и характера разрушения корпуса ОЧ РН (блок «А») позволил выделить типовые элементы конструкции ОЧ РН блок «А», на которые может делиться ОЧ РН при падении. Общая схема вариантов деления приведена на рис. 2 и 3.

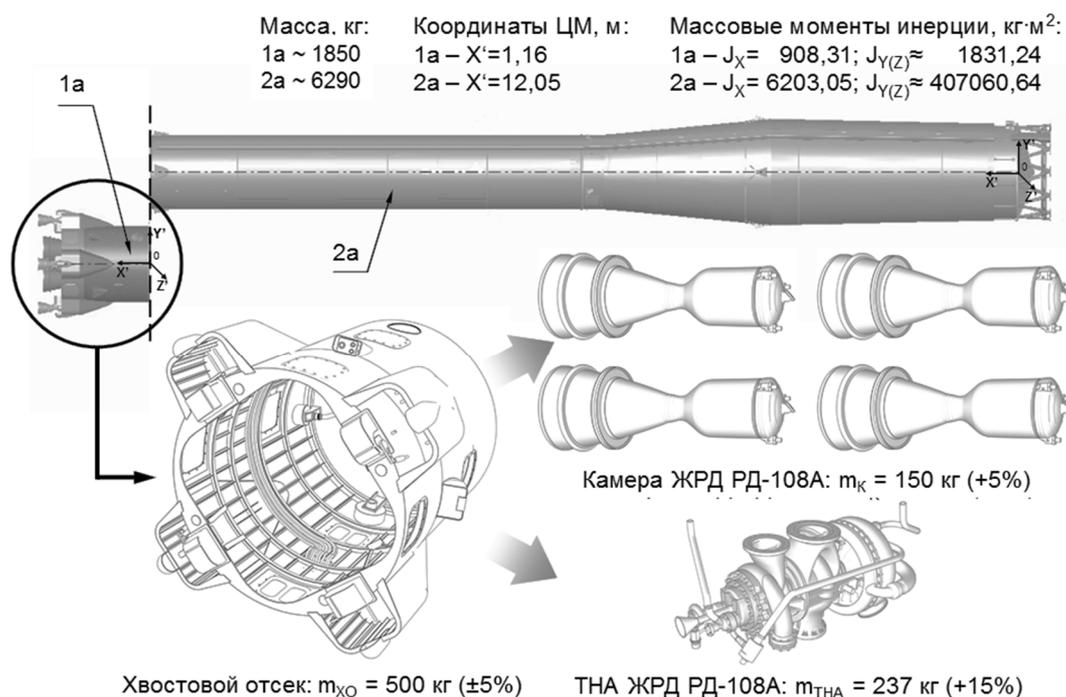


Рис. 2. Массово-геометрические параметры фрагментов конструкции блока «А» в первом варианте деления

В качестве типовых элементов ОЧ блок «А» РН типа «Союз» были выбраны следующие: хвостовой отсек; турбонасосный агрегат двигателя; камера двигателя, агрегатный отсек, бак перекиси водорода, бак жидкого

азота, бак окислителя и бак горючего. На рис. 2 и 3 представлены эскизы внешнего вида данных типовых элементов. Видно, что типовые элементы ОЧ РКН имеют разнообразную форму, причем форма элементов может меняться, так как на агрегатах двигательной установки могут сохраняться после разрушения элементы трубопроводов, штуцеры и т.п. Все эти факторы существенно затрудняют определение аэродинамических характеристик данных элементов.

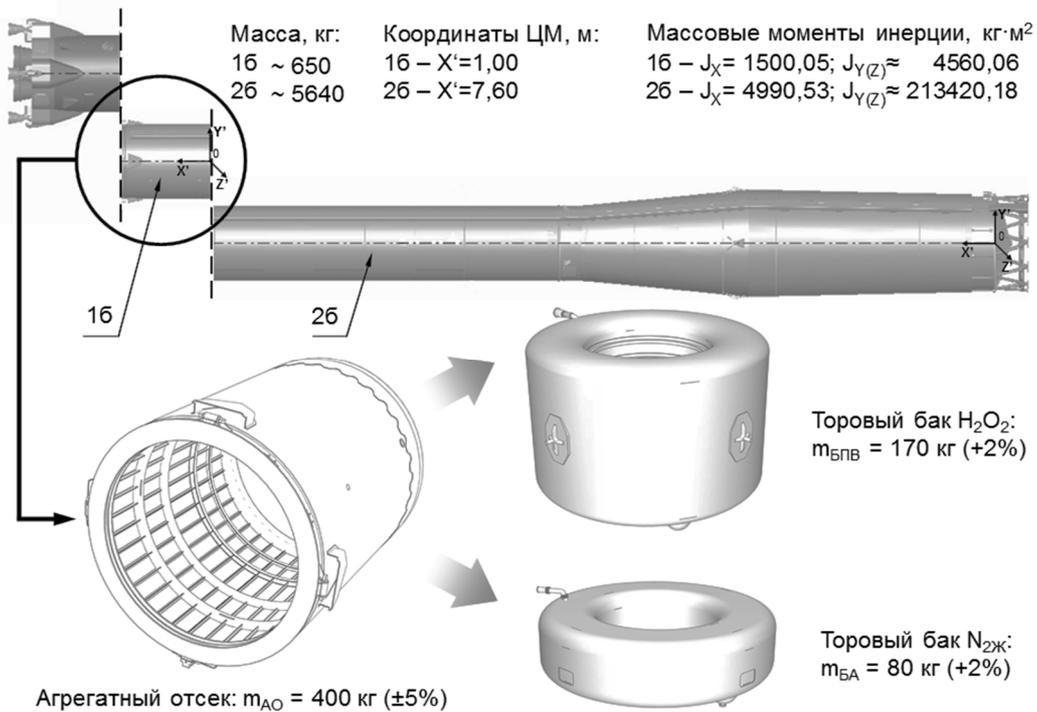


Рис. 3. Массово-геометрические параметры фрагментов конструкции блока «А» во втором варианте деления

Анализ траектории полета показывает, что в случае разрушения ОЧ РН (блок «А») на высотах 40 – 55 км движение основных элементов ОЧ РН происходит на сверхзвуковых скоростях в диапазоне высот от 60 до 15 км и на дозвуковых скоростях в диапазоне высот от 15 км до поверхности Земли, при этом на дозвуковых скоростях элементы ОЧ РН движутся в 2 – 4 раза дольше, чем на сверхзвуковых скоростях [1]. Следовательно, влияние ветра на участке движения с дозвуковой скоростью может оказаться в несколько раз больше. Это обуславливает необходимость определения аэродинамических характеристик элементов ОЧ РН как на сверхзвуковых, так и на дозвуковых скоростях.

Следует отметить, что ориентация в пространстве при движении элементов ОЧ РН не является определенной и на нее могут влиять различные факторы, такие как начальная скорость закрутки относительно произвольных осей при разрушении, наличие элементов гидро- и пневмоарматуры, элементов креплений и т.д. Поэтому для определения аэродина-

мических характеристик ОЧ РН использовался подход, когда приближенными методами определялись значения коэффициента лобового сопротивления элементов ОЧ РН при обдуве его с различных ракурсов на дозвуковых и на сверхзвуковых скоростях полета. Как правило выбирались 3 условных направления («спереди», «сзади» и «сбоку»). По нашему мнению, такой подход вполне приемлем в силу наличия у большинства элементов ОЧ РН осевой симметрии. Это позволяет определить значения максимального, среднего (номинального) и минимального значения коэффициента лобового сопротивления.

Были выполнены расчеты значений аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления элементов ОЧ РН блок «А». Расчеты проводились с использованием данных по сопротивлению плохобтекаемых тел, представленных в работах [4, 5]. Далее результаты ранжировались по степени возрастания. Результаты расчетов значений аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления элементов ОЧ РН блок «А» представлены в табл. Далее указанные значения коэффициентов лобового сопротивления использовались для построения области значений коэффициентов лобового сопротивления от числа Маха.

**Аэродинамические параметры типовых фрагментов
конструкции ОЧ РН типа «Союз»**

Фрагмент	Площадь миделя, м ²	Наименование	Коэффициент лобового сопротивления	
			$M < 1$	$M > 1$
Хвостовой отсек	3,41	мин.	0,1	0,2
		средн.	0,46	0,84
		макс.	0,98	1,55
ТНА двигателя	0,352	мин.	1,019	1,832
		средн.	1,321	2,269
		макс.	1,623	2,705
Камера двигателя	0,407	мин.	0,395	0,72
		средн.	1,351	2,283
		макс.	2,307	3,846
Агрегатный отсек	3,41	мин.	0,098	0,19
		средн.	0,45	0,83
		макс.	0,98	1,54
Бак перекиси водорода	2,15	мин.	0,7	1,36
		средн.	0,837	1,492
		макс.	0,975	1,625
Бак жидкого азота	2,15	мин.	0,356	0,594
		средн.	0,628	1,03
		макс.	0,9	1,466
Бак окислителя	6,75	мин.	2,098	0,882
		средн.	2,877	4,037
		макс.	4,315	7,192
Бак горючего	3,41	мин.	1,058	1,82
		средн.	3,938	6,592
		макс.	6,818	11,364

Расчет осуществлялся на основе типовой зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа Маха [6]. При этом значения коэффициентов в трансзвуковом диапазоне скоростей для чисел Маха $M=0,6-1,3$ определялась исходя из зависимостей коэффициента лобового сопротивления от числа Маха для торца, полусферического, эллиптического затуплений обтекаемого тела или шара. Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 4 и 5.

Представленные зависимости использовались в дальнейшем при проведении имитационного моделирования эллипсов рассеивания элементов ОЧ РН блок «А», при этом значение коэффициента лобового сопротивления определялось для заданного типа элемента с учетом равномерного распределения для заданного числа Маха.

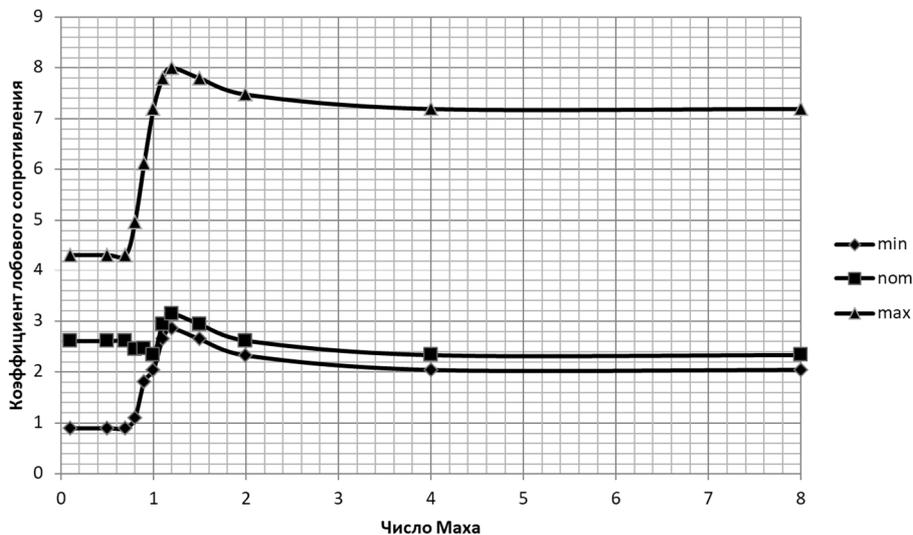


Рис. 4. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от Числа Маха элемента ОЧ РН блок А «Бак окислителя»

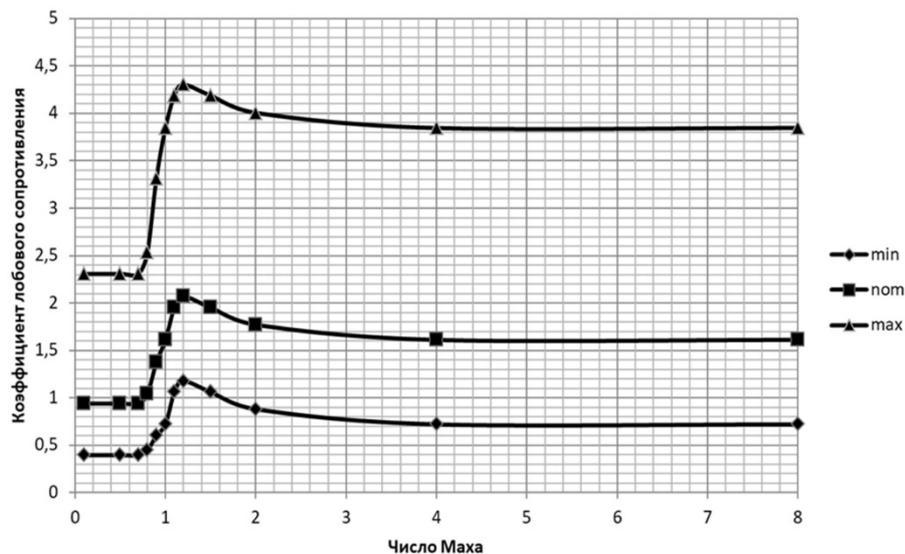


Рис. 5. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от Числа Маха элемента ОЧ РН блок А «Камера двигателя»

Заключение

Задача определения аэродинамических характеристик элементов ОЧ РН в широком диапазоне чисел Маха является актуальной и предназначена для построения более полных и адекватных моделей прогнозирования районов падения.

Рассматриваемая в публикации методика позволяет с приемлемой точностью оценить значения коэффициента лобового сопротивления элементов ОС РН в требуемом диапазоне чисел Маха. Предложенные аэродинамические характеристики использовались при прогнозировании районов падения ОЧ РН и их элементов на примере блока «А» РН типа «Союз».

Список литературы

1. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения, монография / Н.Ф. Аверкиев, В.Н. Арсеньев, К.Б. Болдырев и др.; под ред. д-ра техн. наук М.М. Пенькова, и д-ра техн. наук А.С. Фадеева. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. 426 с.

2. Особенности неуправляемого движения в атмосфере отделяемых частей космических ракет-носителей / А.А. Голиков, В.В. Демешкина, А.П. Леутин, А.С. Филатьев // Доклады Академии наук, 2010. Т. 435, № 4. С. 470–474.

3. Аверкиев Н.Ф., Булекбаев Д.А. Прогнозирование районов падения отделяемых частей ракет-носителей с учетом информации измерительных средств // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2013. Т. 56, № 12. С. 3–6.

4. Петров К.П. Аэродинамика транспортных космических систем. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 368 с.

5. Петров К.П. Аэродинамика элементов летательных аппаратов – М.: Машиностроение, 1985. 271 с.

6. Юрьев А.С., Грачев И.Г., Низовцев В.М. и др. Аэрогидродинамика летательных аппаратов: учебник. Газовая динамика и аэродинамика летательных аппаратов; под ред. Юрьева А.С. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. Ч. 1. 435 с.

Пирогов Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, нач. кафедры, kafedra17@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Карчин Александр Юрьевич, ст. преподаватель, kafedra17@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Белянин Дмитрий Геннадьевич, канд. техн. наук, преподаватель, kafedra17@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Апевалов Игорь Владимирович, научный сотрудник, kafedra17@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

METHODOLOGY OF DETERMINATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF LAUNCH VEHICLES SEPARATE PARTS ELEMENTS

S.Yu. Pirogov, A.Yu. Karchin, D.G. Belyanin, A.V. Apevalov

Approaches to the determination of aerodynamic characteristics of the elements of the detachable parts of carrier rockets formed as a result of the destruction of the latter during motion in the atmosphere are considered. This is necessary to improve the adequacy and accuracy of the forecasting model for the areas of fall of the separated parts. The proposed technique is based on the use of point estimates of aerodynamic coefficients in the range of various Mach numbers and the possible orientation of the element of the detachable part in space. The use of this approach makes it possible to more accurately calculate the time of the movement of the element of the RP balloon before the fall, as well as the effect of wind on the dispersion ellipse.

Key words: detachable part, launch vehicle, aerodynamic characteristics

Pirogov Sergey Yorievich, doctor of technical sciences, docent, head of chair, kafedra17@rambler.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaysky Military Space Academy,

Karchin Aleksandr Yorievich, senior lecturer, kafedra17@rambler.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaysky Military Space Academy,

Belyanin Dmitriy Gennadevich, candidate of technical sciences, lecturer, kafedra17@rambler.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaysky Military Space Academy,

Apevalov Igor Vladimirovich, researcher, kafedra17@rambler.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaysky Military Space Academy

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ И ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА АДАПТИВНОГО АВИАЦИОННОГО КАТАПУЛЬТНОГО УСТРОЙСТВА

А.С. Алексеенков, Ф.С. Беклемищев, В.И. Лалабеков, М.Н. Правидло,
С.Л. Самсонович, К.М. Тихонов

Разработана математическая модель пиротехнического газо-гидравлического источника энергии при последовательной и параллельной его работе с толкателем в составе катапультированного устройства летательного аппарата. Математическая модель позволяет решать задачи параметрического анализа и синтеза на этапе проектных работ построения авиационных катапультированных устройств.

Ключевые слова: пиротехнический газо-гидравлический источник энергии, авиационное катапультированное устройство, толкатель, газо-гидравлический преобразователь энергии вытеснительного типа.

При решении ряда задач, связанных с динамикой движения летательного аппарата (ЛА), требуется в процессе полёта осуществить катапультирование полезного объекта из грузового отсека, обеспечивая при этом минимальные возмущающие воздействия на носитель, не оказывающие существенного влияния на устойчивость и управляемость ЛА, т.е. обеспечивая безопасность отделения. Для адекватного моделирования сложных процессов, протекающих в устройстве катапультирования необходимо иметь в арсенале проектировщика надёжную процедуру имитационного моделирования – комплекса математического обеспечения и инженерных методик с использованием современных компьютерных технологий.

Среди многообразия вариантов технического решения задачи катапультирования наиболее перспективным вариантом представляется пирогазо-гидравлический вариант устройства катапультирования груза [1]. Указанное устройство (далее АКУ) может состоять из двух гидравлических толкателей, оснащённых пиротехническими газо-гидравлическими источниками энергии (ПГГИЭ) вытеснительного типа, расположенных в зонах переднего и заднего бугелей сбрасываемого объекта (рис. 1).

Порядок работы устройства катапультирования:

Исходное состояние: затвор 8 и клапан сброса давления газа 9 перекрыты, давление жидкости и газа $P=1$ кГ/см², пиропатрон обесточен, поршень 7 со штоком 5 находятся в крайнем верхнем положении под силой действия возвратной пружины 6 (предполагается, что замково-стопорное устройство АКУ уже сработало, и система готова к собственно катапультированию).

Рабочее состояние: после подачи электрической команды от системы управления на пиропатрон с форсажным зарядом 4 происходит воспламенение форсажного заряда, образовавшийся газ от которого заполняет газовую полость капсулы 1, и через диафрагму 2 сжимает под давлением $P_{Г} = P_{Ж}$ жидкость, находящуюся в жидкостной полости капсулы 1. При достижении в газовой полости максимального давления P_{max} замыкаются контакты сигнализатора давления 11, которые в цепи системы управления активируют электрическую связь 12 канала системы управления АКУ. Вследствие этого автоматически происходит подача сигнала от системы управления на пиро- или электро-затвор 8. Жидкость под давлением поступает в поршневую полость силового цилиндра 3, обеспечивая движение поршня 7 со штоком 5 до крайнего нижнего положения. При достижении поршнем крайнего нижнего положения происходит замыкание концевых выключателей в командной цепи расфиксации механизма сброса груза. По окончании сброса рабочего объекта, от системы управления подаётся сигнал на открытие клапана сброса давления газа 9. В результате падения давления в газовой и в жидкостной полостях капсулы 1 происходит возвратное движение поршня 7 со штоком 5 под действием пружины 6 до достижения крайнего верхнего положения.

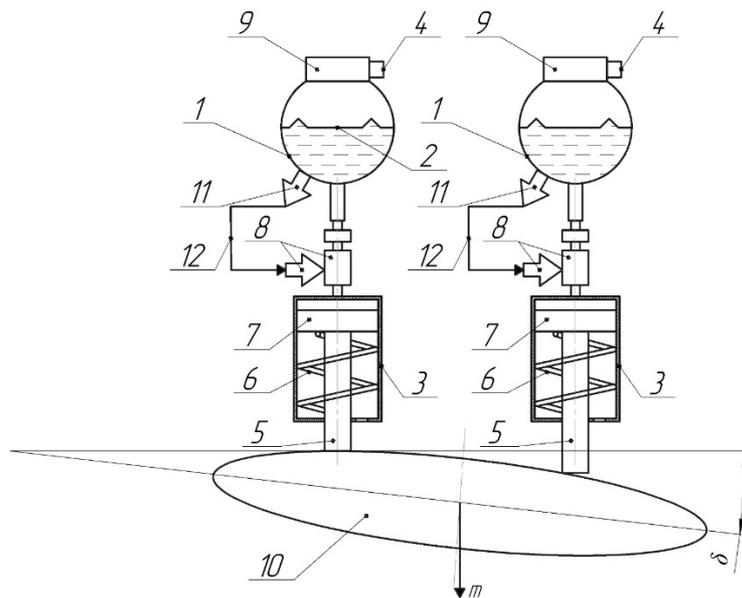


Рис. 1. Принципиальная схема АКУ с последовательной работой ИП и толкателя: 1 – капсула с газом и жидкостью; 2 – диафрагма; 3 – силовой цилиндр; 4 – пиропатрон с форсажным зарядом; 5 – шток; 6 – возвратная пружина; 7 – поршень (толкатель); 8 – пиро- или электро- затвор; 9 – клапан сброса давления газа; 10 – катапультируемый объект; 11 – сигнализатор давления; 12 – канал системы управления затвором 8; δ – угол наклона продольной оси объекта к продольной оси носителя

Конечное состояние: После достижения поршнем 7 со штоком 5 крайнего верхнего положения и заполнения рабочей жидкостью капсулы 1 от системы управления поступает электрическая команда на возврат газового клапана 9 и затвора 8 в исходное закрытое положение.

Разработанная в работах [1, 2] математическая модель устройства катапультирования груза ограничена работой только гидравлического контура без учёта динамики запуска и работы пиротехнического источника газовой энергии. Данное обстоятельство обуславливает работу исполнительного механизма – гидравлических толкателей при мгновенном образовании давления рабочей жидкости в газовой полости вытеснительного источника энергии, что не в полной мере соответствует штатной временной циклограмме реального механизма взаимодействия энергетического тракта привода с потребителем – гидравлическими толкателями.

Следует отметить, что целью работы механизма является одновременная доставка груза к точке сброса толкателями, движущимися с разным ходом и заданными скоростями. Решение этой задачи, улучшающей качество переходных процессов, обеспечивается охватом каждого исполнительного механизма, включающего гидравлический толкатель и нагрузку, отрицательной обратной связью по положению и скорости толкателя, переводя АКУ в разряд адаптивных (следящих) систем [1].

В предлагаемой математической модели последовательная (или одновременная) работа источника энергии и потребителя обеспечивается автоматическими средствами системы управления. Указанная последовательность реализуется электрической командой от сигнализатора давления за счёт включения пиро- или электро-затвора переменного проходного сечения, установленного между источником и потребителем (толкателем), после достижения максимального давления в газовой полости. Следует отметить, что предлагаемая математическая модель позволяет исследовать процессы, протекающие в пиро-гидравлической системе АКУ, как при последовательной, так и при одновременной (параллельной) работе ПГГИЭ и толкателя. Происходящие в предлагаемой модели процессы воспроизводят более точную и полную картину механизма взаимодействия элементов привода для катапультирования груза.

Расчётная схема ПГГИЭ представлена на рис. 2. Процессы, происходящие в рассматриваемом механизме катапультирования, описываются следующими законами и уравнениями [3, 4]:

закон сохранения массы в пиро-газо-гидравлическом источнике энергии;

уравнение Менделеева–Клапейрона для состояния газа в переменном газовом объёме капсулы источника энергии;

уравнение Ньютона для баланса сил, действующих в механизме толкателя.

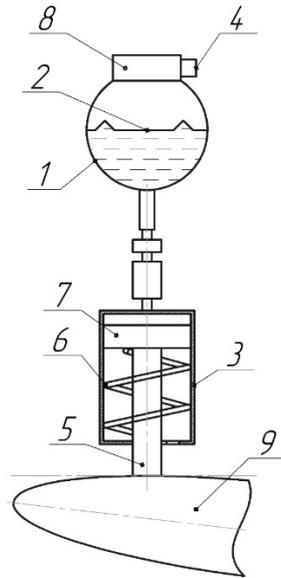


Рис. 2. Расчётная схема устройства катапультирования груза при одновременной (параллельной) работе ПГГИЭ и толкателя: 1 – капсула с газом и жидкостью; 2 – диафрагма; 3 – силовой цилиндр; 4 – пиропатрон с форсажным зарядом; 5 – шток; 6 – возвратная пружина; 7 – поршень (толкатель); 8 – клапан сброса давления газа; 9 – катапультируемый объект

1. Уравнение баланса массового секундного расхода для ПГГИЭ совместно с уравнением состояния в газовом объёме вытеснителя

$$u_1 \cdot \rho_T \cdot S \cdot P^\nu = \frac{V_{\Gamma}}{RT} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{V_{\text{Ж}} \cdot \rho_{\Gamma}}{E} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{P}{RT} \cdot (Q_{\text{Ж}} + Q_{\text{T}}), \quad (1)$$

где $u_1 = 0,012$ – чувствительность скорости горения топлива к температуре эксплуатации; $\rho_T = 1,55 \cdot 10^{-3}$ кг/см³ – плотность топлива; $S = 14000$ см² – поверхность горения топлива; $\nu = 0,62$ – показатель степени в законе горения топлива; $V_{\Gamma} = 800$ см³ и $V_{\text{Ж}} = 232$ см³ – объёмы газовой и жидкостной полостей; $R = 4000$ кГ·см/кг·К – универсальная газовая постоянная; $T = 1400$ К – температура газа, $E = 13000$ кГ/см² модуль упругости рабочей жидкости; $Q_{\text{Ж}}(t) = \frac{dV_{\text{Ж}}}{dt}$ – объёмный расход жидкости в толкателе,

$Q_{\text{T}}(t) = u_1 \cdot S \cdot P^\nu$ – объёмный расход топлива.

2. Уравнение баланса расхода жидкости, затрачиваемой на создание скорости в толкателе:

$$\frac{dV_{\text{Ж}}}{dt} = Q_{\text{Ж}}(t) = A \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{Ж}}$ – расход жидкости; A – эффективная площадь поршня толкателя; h – ход толкателя.

3. Уравнение баланса сил, действующих на толкатель:

$$A \cdot P(t) = m \frac{d^2 h}{dt^2} + n \cdot G = m \frac{d^2 h}{dt^2} + n \cdot m \cdot g \quad (3.1)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{A}{m} \cdot \int P(t) \cdot dt - n \cdot g \cdot \int dt \quad (3.2)$$

$$Q_{\text{Ж}} = A \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{A^2}{m} \cdot \int P(t) \cdot dt - A \cdot n \cdot g \cdot \int dt \quad (3.3)$$

где m – масса сбрасываемого объекта; n – перегрузка; g – ускорение свободного падения.

После подстановки (2) и (3.3) в (1) получим следующее уравнение:

$$k_{\text{T}} \cdot S \cdot P^{\nu} = k(V_{\text{Ж}}) \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{P}{RT} \cdot \left(\frac{A^2}{m} \cdot \int P(t) \cdot dt - A \cdot n \cdot g \cdot \int dt + u_1 \cdot S \cdot P^{\nu} \right), \quad (4)$$

где $k_{\text{T}} = u_1 \cdot \rho_{\text{T}}$, $k(V_{\text{Ж}}) = \frac{V_{\text{T}}}{RT} + \frac{V_{\text{Ж}} \cdot \rho_{\text{Ж}}}{E}$, $\rho_{\text{Ж}} = 0,867 \cdot 10^{-3}$ кг/см³ плотность рабочей жидкости.

Это уравнение справедливо не только до момента времени, пока давление в газовой полости ПАД не достигнет $P_{\text{max}} = 350$ кг/см² за счёт окончания горения заряда (когда $S=0$), но и обеспечивает решение задачи до конца движения толкателя, когда $h = 20$ см, за счёт работы газа при увеличении объёма в газовой полости капсулы в соответствии с уравнением:

$$k(V_{\text{Ж}}) \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{P}{RT} \cdot \left(\frac{A^2}{m} \cdot \int P(t) \cdot dt - A \cdot n \cdot g \cdot \int dt \right) = 0. \quad (5)$$

Преобразованное для составления математической модели выражение имеет вид:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{k(V_{\text{Ж}})} \left[k_{\text{T}} \cdot S \cdot P^{\nu} - \frac{P}{RT} \cdot \left(\frac{A^2}{m} \cdot \int P(t) \cdot dt - A \cdot n \cdot g \cdot \int dt + u_1 \cdot S \cdot P^{\nu} \right) \right]. \quad (6)$$

Блок-схемы математических моделей, соответствующих преобразованному выражению для параллельной (рис. 3, а) и последовательной (рис. 3б) работы ПГГИЭ и толкателя (ТЛК), представлены ниже.

Особенностью работы математической модели является наличие в ней логических элементов *Relation Operator*, обеспечивающих в процессе решения задачи изменение структуры уравнений при достижении в источнике энергии максимального давления P_{max} и обнуления поверхности горения $S=0$, а также отключение решения задачи в момент достижения максимального хода толкателя h_{max} . В результате реализуется принцип непрерывности в решении задачи от момента запуска источника энергии до остановки толкателя.

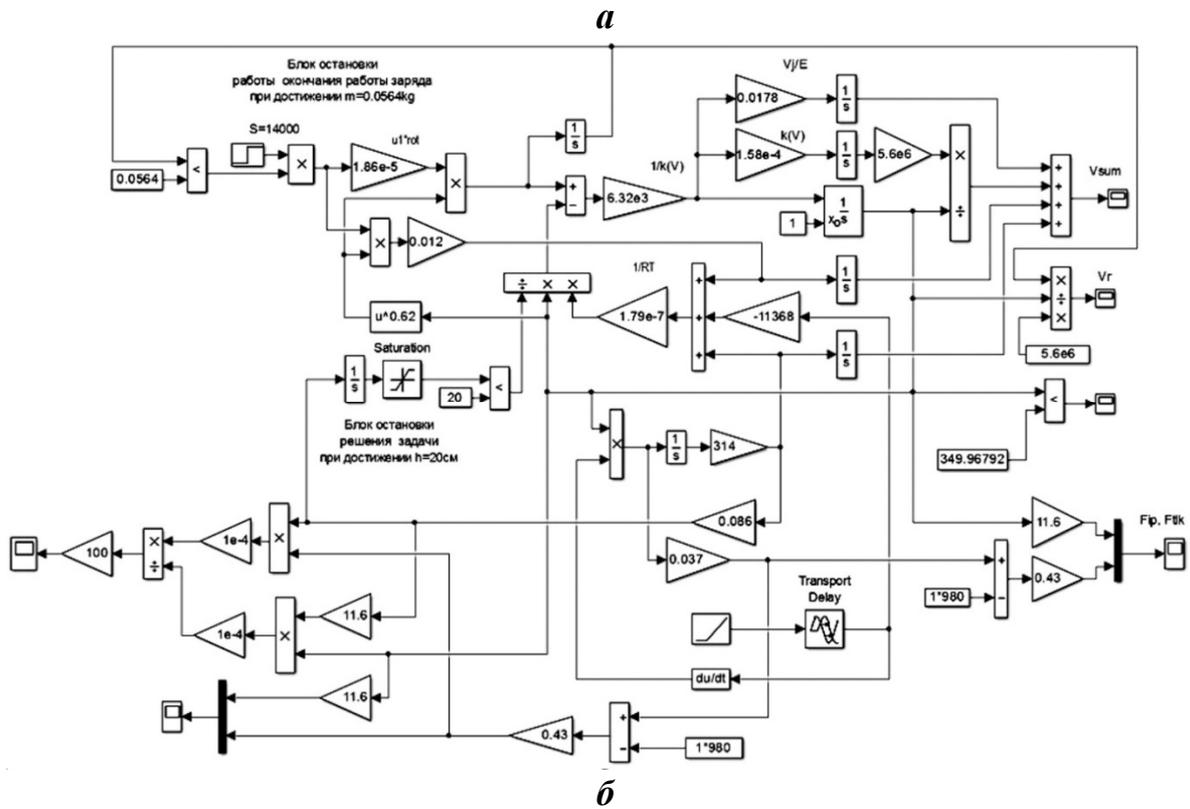
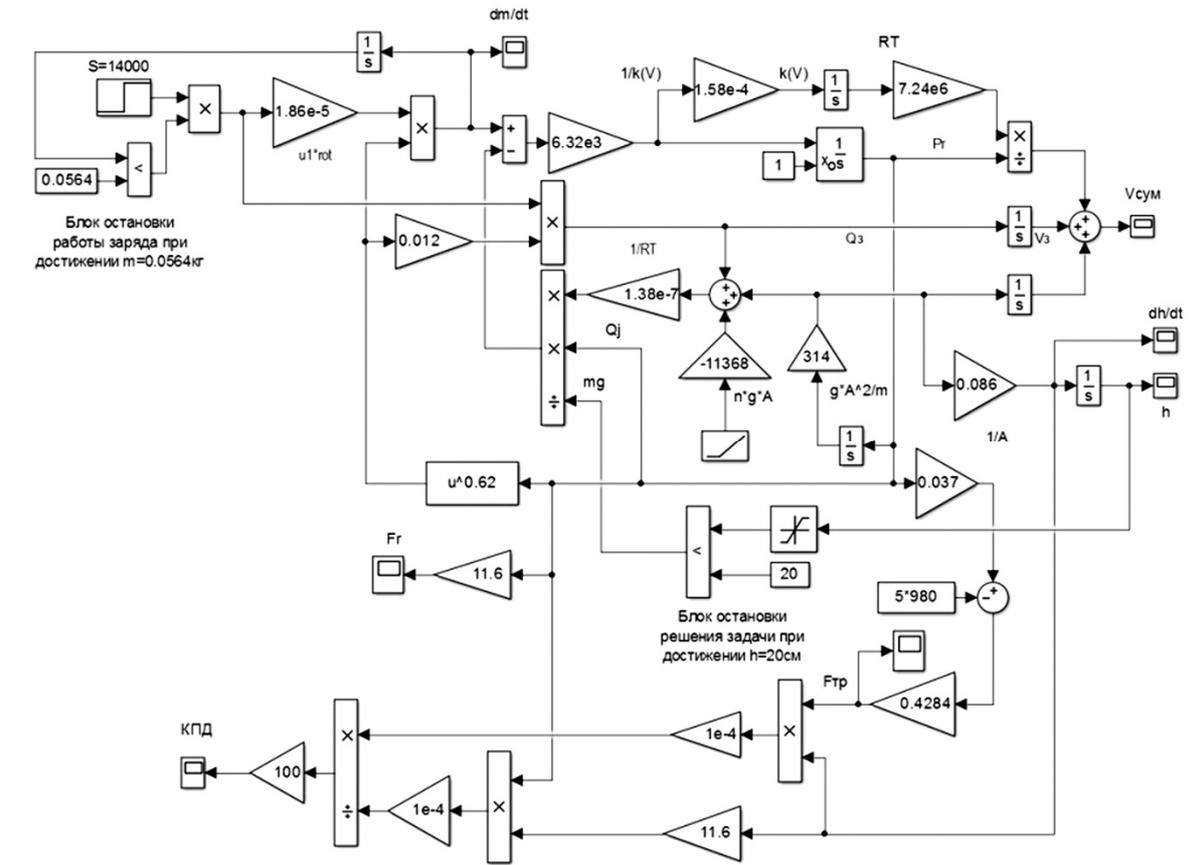


Рис. 3. Структурная схема: а - математической модели параллельной работы ПГГИЭ и толкателя; б - последовательной работы ПГГИЭ и толкателя

Следует отметить, что непрерывное решение задачи нарушается в момент окончания работы заряда при $S=0$ вследствие невозможности обеспечения точного срабатывания блока *Relation Operator* при достижении максимального значения давления P_{max} из-за погрешности представленных в среде *Simulink* методов интегрирования. Чтобы обойти эту ситуацию, необходимо использовать следующий алгоритм:

1. Построить блок отключения поверхности горения заряда S с использованием блока *Relation Operator*, построенного по схеме с ограничением массы газа m в объёме V_{Γ} при достижении давления P_{max} ;

2. Определить на выходе блока *Relation Operator* время достижения P_{max} в информационном Блоке *определения времени достижения P_{max}* ;

3. Для модели с последовательной работой ПГГИЭ и толкателя скопировать точную величину времени $\tau_{P_{max}}$, представленную в выходном блоке *Relation Operator*, и установить в командную строку *Time Delay* блока *Transport Delay*, в меню схемы включения нагрузки;

4. Для формирования информационных блоков, регистрирующих мощность и КПД источника энергии, в математических моделях как параллельной, так и последовательной работы необходимо использовать следующие соотношения:

$$N_{ИЭ} = P_{\Gamma} \cdot Q = P_{\Gamma} \cdot A \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (7)$$

$$N_{ТЛК} = F \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (8)$$

$$\text{КПД} = \frac{N_{ТЛК}}{N_{ИЭ}} \cdot 100\% \quad (9)$$

5. Включить решение задачи.

Выводы

1. На основании законов сохранения массы газа и жидкости, баланса сил в исполнительной силовой части, описанных дифференциальными уравнениями, разработана математическая модель, позволяющая решать задачи анализа и синтеза параметров сложной газо-гидро-механической системы, которой является механизм катапультирования АКУ.

2. Предлагаемая математическая модель обеспечивает решение задачи динамики непрерывного движения механизма катапультирования с учётом параметрического взаимодействия элементов, включая ПГГИЭ, составляющих систему сброса груза ЛА как при параллельной (одновременной) работе ИЭ и ТЛК, так и при последовательной работе ИЭ и ТЛК.

3. Разработанная математическая модель катапультирного устройства сброса груза может быть рекомендована для проведения анализа и параметрического синтеза на этапе проектно-конструкторских работ по созданию перспективных образцов авиационных катапультирных устройств летательных аппаратов.

Список литературы

1. Пресняков В.М., Правидло М.Н. Численное моделирование адаптивного авиационного катапультного устройства // Техника воздушного флота. 2001. Т. LXXV. № 3-4 (650-651). С.66–75.
2. Круглов Ю.А. Системы катапультирования ракет / Ю.А. Круглов [и др.]. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2010. 184 с.
3. Лалабеков В.И., Прилипов А.В. Газогидравлический рулевой привод органов управления ЛА. Основы разработки. М., ФГУП «НПЦ «Информтехника», 2012. 252 с.
4. Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И., Чуканов К.П. Математические модели систем пневмоавтоматики: учебное пособие. Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 294 с.

Алексеенков Артём Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, atovus@yandex.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИ),

Беклемищев Филипп Сергеевич, аспирант, philipmsk@gmail.com, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИ),

Лалабеков Валентин Иванович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, lalabekov.valentin@yandex.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИ),

Правидло Михаил Натанович, д-р техн. наук, профессор, info@vumpelmkb.com, Россия, Москва, АО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова»,

Самсонович Семён Львович, д-р техн. наук, профессор, samsonovich40@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИ),

Тихонов Константин Михайлович, канд. техн. наук, доцент, ktixo@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИ)

THE DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE POWER SOURCE AND ACTUATOR OF ADAPTIVE AIRCRAFT EJECTION LAUNCHER

A.S. Alekseenkov, F.S. Beklemishev, V.I. Lalabekov, M.N. Pravidlo, S.L. Samsonovich, K.M. Tihonov

The development of mathematical model of a gas-hydraulic power supply with pyrotechnic power source which works in a parallel or sequential with an ejecting hydraulic cylinder is shown in this article. The mathematical model allows to solve the purposes of the parametric analysis and synthesis of a basic parameters of adaptive aircraft ejection launcher at the draft design stage.

Key words: gas-hydraulic power source, actuator, aircraft ejection launcher, mathematical simulation.

Alekseenkov Artem Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, atovus@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Beklemishev Philip Sergeevich, postgraduate, philipmsk@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Lalabekov Valentin Ivanovich, doctor of technical sciences, researcher, Lalabekov.Valentin@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Pravidlo Mikhail Natanovich, doctor of technical sciences, professor, info@vypelmkb.com, Russia, Moscow, «Vypel» State Engineering Design Bureau JSC named after I.I. Toropov,

Samsonovich Semyon Lvovich, doctor of technical sciences, professor, Samsonovich40@gmail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Tikhonov Konstantin Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, ktixo@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

УДК 621.396

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

А.В. Малюгин, Л.В. Пилипенко, В.А. Пирухин

В статье рассмотрен методический подход оценивания готовности измерительного комплекса, к обеспечению испытаний вооружения, военной и специальной техники, позволяющий с учетом номенклатуры разнородных средств измерений, точности их работы, состава измеряемых параметров, оптимизировать их расположения по критерию минимума погрешности оценивания вектора параметров движения объекта испытаний.

Ключевые слова: объект испытаний, параметры движения, показатель точности, измерительный комплекс, средства измерений.

Задачи, связанные с развитием методологии полигонных испытаний образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), отличаются сложностью, большой размерностью, многокритериальностью, многоаспектностью. Данные задачи осложняются наличием разнородных ошибок при наборе статистических данных о процессах, происходящих при полигонных испытаниях [1].

Под испытаниями понимается процесс экспериментального определения (оценивания, контроля) количественных качественных характеристик сложного технического комплекса (СТК) при функционировании с учетом воздействия на него различных факторов, а так же при моделировании поведения объекта испытаний с учётом воздействия на него таких факторов [2].

Для всесторонней отработки вновь создаваемых и модернизируемых СТК на испытательных полигонах используются измерительные комплексы (ИК). Важнейшей задачей ИК состоящего из разнотипных средств измерений (СИ) и системы статистической обработки выдаваемой ими информации, является оценка параметров движения объекта испытаний (ОИ) на интервалах измерения и прогнозирования его последующего движения [3].

В настоящее время возможности проведения натурных экспериментов сильно ограничены, особенно для тех объектов на которые необходимы большие временные затраты и большие затраты материальных ресурсов на создание самого объекта и на привлечение средств обеспечивающих его испытания. Поэтому исследования и получение оценок характеристик параметров движения проводятся с применением математических моделей и алгоритмов, которые могут с требуемой точностью отражать все необходимые параметры реального объекта испытаний (ОИ) и не требуют больших материальных затрат.

Решим задачу по созданию такой математической модели, которая обеспечит проведение научных исследований по оценке показателей качества функционирования ИК.

Описание модели оценивания влияния структуры измерительного комплекса на эффективность его применения

Под математическим обеспечением процесса оценивания влияния структуры измерительного комплекса на эффективность его применения понимается совокупность алгоритмов решения различных задач проведения измерений в ходе испытаний.

В общую математическую модель оценивания влияния структуры ИК на эффективность его применения входят (рис.1):

- математическая модель движение ОИ $d\Theta(t) = A(t) \cdot \Theta(t) + B(t) \cdot dW$;
- математическая модель измерений ИК

$$d\hat{\Theta}(t) = A(t) \cdot \hat{\Theta}(t) + K(t) \cdot [\xi(t) - H(t) \cdot \hat{\Theta}(t)];$$

- алгоритм оценивания показателя точности

$$\theta = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T;$$

- алгоритм расчета показателя эффективности применения ИК

$$P\{\hat{\theta} \in R_N\} = \prod_{i=1}^N \left[\left(\Phi \left(\frac{\beta_i - M_{\hat{x}_i}}{\sigma_{\hat{x}_i}} \right) - \Phi \left(\frac{\alpha_i - M_{\hat{x}_i}}{\sigma_{\hat{x}_i}} \right) \right), \dots, \left(\Phi \left(\frac{\beta_i - M_{\hat{v}_{zi}}}{\sigma_{\hat{v}_{zi}}} \right) - \Phi \left(\frac{\alpha_i - M_{\hat{v}_{zi}}}{\sigma_{\hat{v}_{zi}}} \right) \right) \right];$$

- алгоритм оптимизации расположения СИ

$$\hat{\sigma}_{WA} \theta = \left((k_{11, \kappa_1} + k_{11, \kappa_2})^{1/2} + (k_{22, \kappa_1} + k_{22, \kappa_2})^{1/2} + \dots + (k_{KK, \kappa_1} + k_{KK, \kappa_2})^{1/2} \right) / K.$$

Для описания модели определяются исходные данные:

- тактико-технические характеристики ОИ;
- тактико-технические характеристики СИ, их количество;

- координаты в местной топоцентрической системе координат $OXYZ$;

- характеристики точности измерений для каждого СИ σ_{r_i} ;

- источники систематических погрешностей измерений.

Используя динамические модели в описании состояний, описывается модель движения ОИ, которая учитывают как влияние внешней среды, так и влияние управляющих импульсов на ОИ, что и позволяет описать модель движения баллистических и аэродинамических ОИ.

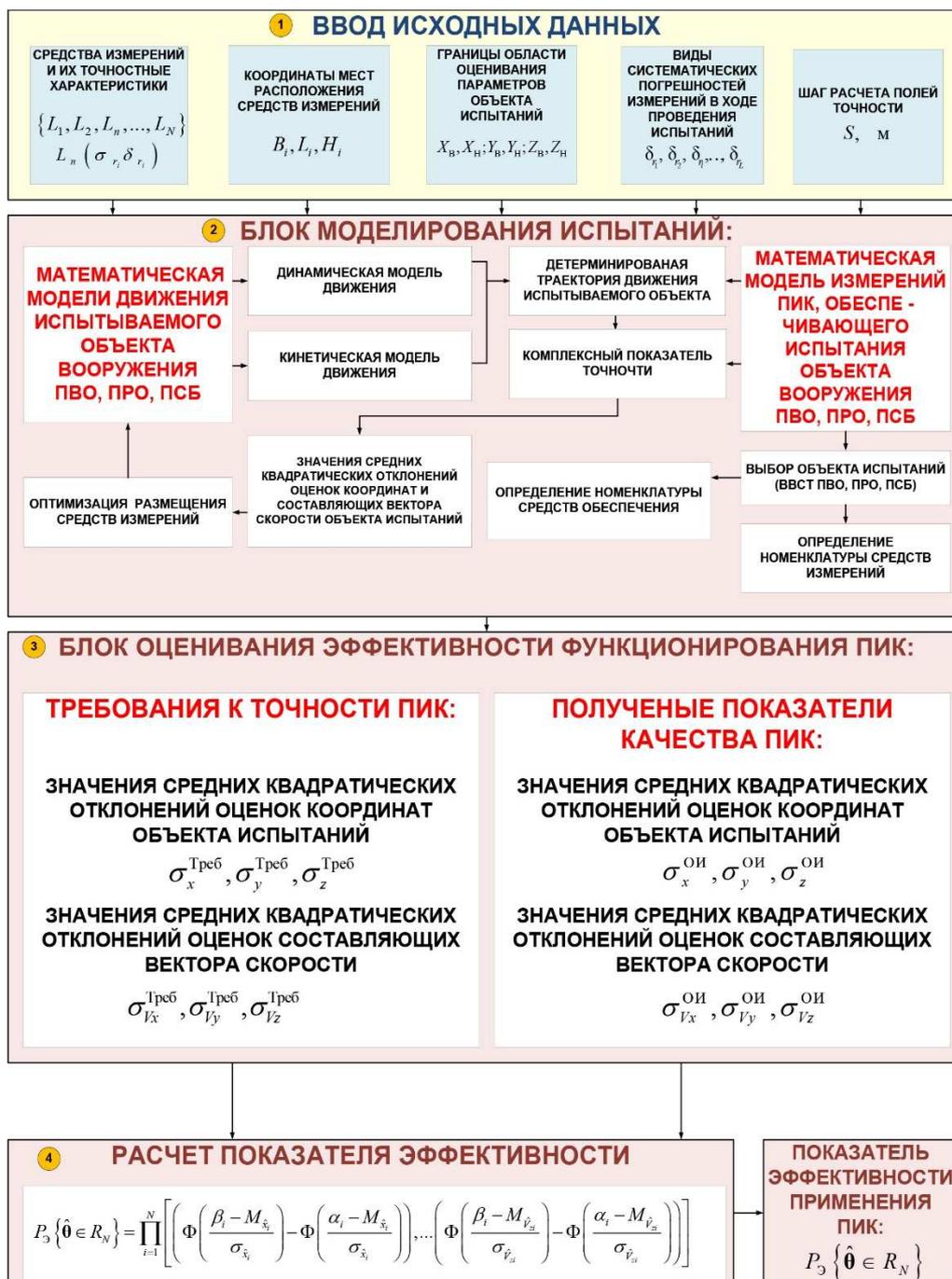


Рис. 1 Структурная схема модели оценивания влияния измерительного комплекса на эффективность его применения

Модель движения ОИ в пространстве состояний для непрерывного времени описывается стохастическим дифференциальным уравнением [4,5]:

$$d\Theta(t) = A(t) \cdot \Theta(t) + B(t) \cdot dW, \quad (1)$$

где $\Theta(t)$ – расширенный вектор состояния динамической системы, в состав которой входит вектор оцениваемых параметров движения испытываемого образца ВВСТ $\theta(t)$, вектор управления и другие компоненты; $A(t), B(t)$ – матрицы заданной размерности; $W(t)$ – векторный винеровский случайный процесс, соответствующий размерности.

Для проведения оценки функционирования подсистемы статистической обработки измерительной информации как сложной стохастической системы, которая в данном случае является частью ИК, описывается её математическая модель измерений. Для этого определяется совокупность величин, которые будут служить количественными характеристиками функционирования этой подсистемы и устанавливаются соотношения между этими величинами.

При построении модели кроме входных и выходных сигналов, вводятся переменные величины (вектор состояния), которые характеризуют воздействие различных подсистем друг на друга. В нашем случае это координаты расположения СИ на измерительных пунктах (мобильных СИ) пристатртового района, испытательной трассы и финишного полигона, точностные характеристики СИ, которые обеспечивают испытание определенного образца.

Вектор $\theta(k)$ параметров движения ОИ для заданной точки траектории его полета имеет нормальное распределение и задается в виде [2]:

$$\theta = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T, \quad (2)$$

где $\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3$ – вектор координат ОИ и составляющие вектора скорости и вектора ускорения ОИ в полигонной системе координат соответственно.

После описания модели движения и модели измерений оценивается потенциальная точность ИК с разделением погрешности на составляющие. Смещение вектора $\hat{\theta}$ относительно истинного значения можно записать в виде [6]:

$$M_{\hat{\theta}} = [\delta\hat{q}_1 \ | \ \delta\hat{q}_2 \ | \ \dots \ | \ \delta\hat{q}_k]^T, \quad (3)$$

где $\delta\hat{q}_1, \delta\hat{q}_2, \dots, \delta\hat{q}_k$ – математические ожидания оценок параметров движения ОИ.

Оценка погрешностей параметров движения ОИ проводится с помощью апробированных методов статистической обработки результатов измерений без линеаризации нелинейной зависимости, измеряемых параметров движения ОИ от оцениваемых.

Далее определяются систематические составляющие погрешностей оценок параметров движения ОИ, которые получаются в результате решения системы нормальных уравнений.

Для решения задач оценивания готовности ИК к обеспечению испытаний ОИ необходимо разработать алгоритм (рис.2), позволяющий с учетом номенклатуры разнородных СИ, точности их работы, состава измеряемых параметров, оптимизировать их расположения по критерию минимума погрешности оценивания вектора параметров движения ОИ.

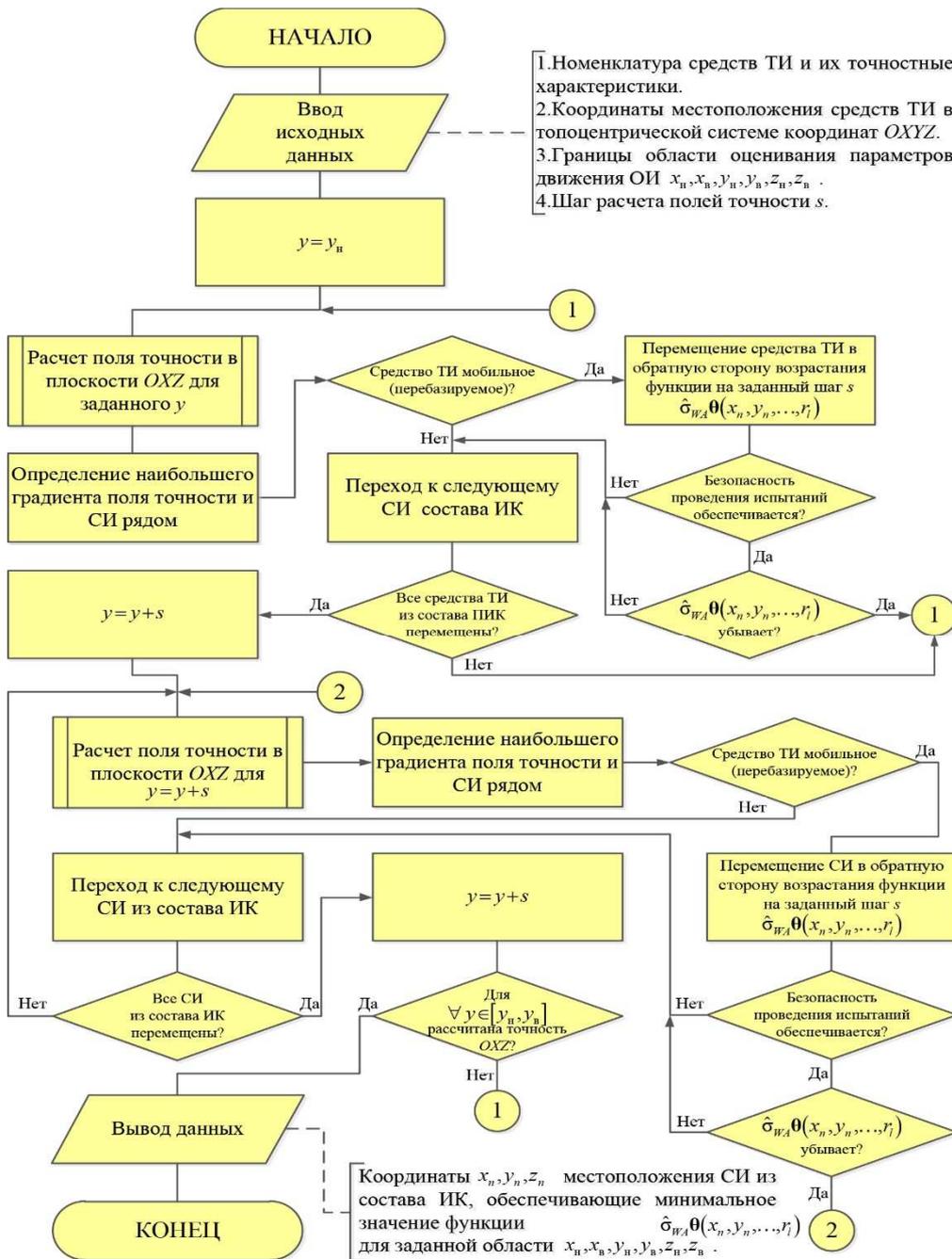


Рис. 2. Обобщенная структурная схема алгоритма оптимизации расположения СИ

Критерием оптимизации в задаче расположения средств ТИ из состава ПИК будет являться случайная составляющая погрешности средневзвешенной оценки вектора параметров движения ОИ (θ) вида [7]:

$$\hat{\sigma}_{WA}\theta = \left((k_{11, K_1} + k_{11, K_2})^{1/2} + (k_{22, K_1} + k_{22, K_2})^{1/2} + \dots + (k_{KK, K_1} + k_{KK, K_2})^{1/2} \right) / K. \quad (4)$$

В основе разработанного алгоритма оптимизации расположения СИ лежит численный метод отыскания безусловного экстремума функции – градиентный метод с постоянным шагом

В качестве минимизируемой функции выступает функция вида

$$\hat{\sigma}_{WA}\theta(x_n, y_n, z_n, x_{OИ}, y_{OИ}, z_{OИ}, r_l), \quad (5)$$

$$n = \overline{1, N}, \quad x_{OИ} \in [x_n, x_B], \quad y_{OИ} \in [y_n, y_B], \quad z_{OИ} \in [z_n, z_B], \quad l = \overline{1, L},$$

где N – количество средств ТИ, $x_n, x_B, y_n, y_B, z_n, z_B$ – границы области определения функции $\hat{\sigma}_{WA}\theta(x_n, y_n, \dots, r_l)$.

Необходимо отметить, что аргументы $x_{OИ}, y_{OИ}, z_{OИ}, r_l$ функции $\hat{\sigma}_{WA}\theta(x_n, y_n, \dots, r_l)$ имеют заданные значения, а в процессе ее минимизации изменяются месторасположения средств ТИ, задаваемые x_n, y_n, z_n .

Для минимизации функции $\hat{\sigma}_{WA}\theta(x_n, y_n, \dots, r_l)$ формируется поле точности в границах $x_n, x_B, y_n, y_B, z_n, z_B$ с заданным шагом расчета s в горизонтальной плоскости $OХZ$ с определенным значением $y \in [y_n, y_B]$, анализ градиентов сформированного поля точности позволяет определить направление наибольшего возрастания функции $\hat{\sigma}_{WA}\theta(x_n, y_n, \dots, r_l)$.

Далее определяется СИ, находящееся ближе всего к наибольшему градиенту сформированного поля точности с привязкой к полигонной топоцентрической системе координат $OXYZ$. Затем СИ перемещается на величину шага расчета поля точности (s) и осуществляется повторный расчет поля точности для измененного расположения СИ с учетом изменений значений аргументов функции $\hat{\sigma}_{WA}\theta(x_n, y_n, \dots, r_l)$.

Представленная процедура повторяется итерационно для каждого СИ до момента прекращения изменения значения функции $\hat{\sigma}_{WA}\theta(x_n, y_n, \dots, r_l)$ в меньшую сторону.

Необходимо отметить, что на каждой итерации проверяется возможность перемещения СИ и выполнение требований по безопасности проведения испытаний. Область оценивания параметров движения ОИ задается из условия прохождения через нее трассы полета ОИ и(или) трассы полета мишени или из условия их возможного района встречи.

Считается, что возможности СИ из состава ИК по сопровождению ОИ соответствуют его параметрам движения, а для оптико-электронных средств СИ обеспечивается метеорологическая дальность видимости.

Заключение. Таким образом, представленная модель оценивания влияния структуры измерительного комплекса на эффективность его применения, с разделением погрешности на составляющие и разработанный алгоритм оптимизации расположения СИ могут применяться при математическом моделировании функционирования СИ в составе ИК, а рассчитанные с ее использованием значения быстроменяющихся случайных и систематических составляющих погрешностей оценок параметров движения ОИ позволяют учитывать влияние различных факторов на точность оценивания параметров его движения.

Список литературы

1. Буренок В.М., Найденов В.Г., Орлов П.Р. Некоторые направления реформирования испытательного комплекса МО РФ // *Военная мысль*, 2004. № 9.
2. Буренок В.М., Найденов В.Г., Поляков В.И. Математические методы и модели в теории информационно-измерительных систем / РАРАН. Редкол. серии: В.В. Панов (пред) и др. М.: Машиностроение, 2001. 336 с.
3. Буренок В.М., Найденов В.Г. Методы повышения эффективности применения средств и систем обеспечения испытаний, вооружения, военной и специальной техники. М.: Издательский дом «Граница», 2006. 274 с.
4. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и её применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
5. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления. М.: Наука, 1985. 296 с.
6. Таха Х. Введение в исследование операций. М.: Мир, 1985. 217 с.
7. Крупский К.А. Успенский К.К. Методический подход к определению систематических составляющих погрешностей оценок параметров движения объекта наблюдения // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*, 2017. Вып. 657. С. 53–59.

Малюгин Александр Викторович, канд. военных наук, начальник 24 отдела военного института, awmalugin@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Пирухин Виталий Александрович, старший научный сотрудник 241 лаборатории военного института, pirookhin@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Пилipенко Людмила Викторовна, младший научный сотрудник 242 лаборатории военного института, lysi-65@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

MODEL OF ESTIMATION OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF MEASURING COMPLEX

A.V. Malyugin, V.A. Pirukhin, L.V. Pilipenko

The article considers a methodical approach to assessing the readiness of a measuring complex, ensuring testing of weapons, military and special equipment, which, taking into account the nomenclature of heterogeneous means of measurement, the accuracy of their operation, the composition of the measured parameters, optimize their location by the criterion of the minimum of the estimation error vector of motion parameters of the test object.

Key words: test object, parameters of motion, accuracy index, measuring complex, measuring instruments.

Malyugin Alexander Viktorovich, candidate of military sciences, head 24 departments of the military institute (research), awmalugin@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky,

Pirukhin Vitaly Alexandrovich, senior researcher 241 laboratories of the military institute (research), pirookhin@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky,

Pilipenko Lyudmila Viktorovna, junior research fellow 242 laboratories of the military institute (research), lysi-65@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky

УДК 532.528

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЫСОКОАМПЛИТУДНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ, СНИЖАЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ АГРЕГАТОВ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

А.С. Перфильев, А.Э. Султанов, С.Ю. Герасименко

Изложены основные результаты теоретико-экспериментальных исследований по выявлению закономерностей возбуждения высокоамплитудных низкочастотных продольных колебаний в различных частях корпуса ракет-носителей, а также взаимосвязь их с амплитудами вибрации. Представлены результаты апробации конечно-массовой динамической модели по результатам анализа телеметрической информации, полученной по результатам летных испытаний ракет-носителей легкого класса. Отмечены факторы, определяющие стохастический характер возбуждения продольных колебаний при взаимодействии упругого корпуса ракеты и амплитудно-частотных характеристик двигателя, способствующих возрастанию амплитуд вибрации.

Ключевые слова: продольные автоколебания колебания, высокоамплитудная низкочастотная вибрация, усталостное разрушение трубопроводов, ракета-носитель, двигательная установка.

Функционирование ракеты-носителя (РН) в полете как сложной динамической системы характеризуется проявлением механических колебаний (вибрации) с различными частотами и амплитудами. Источниками вибрации являются пульсация тяги ракетных двигателей, внешние аэродинамические силы. В зависимости от частоты, на которой проявляется

источник вибрации, они по-разному воздействуют на критичные элементы систем РН. Чем выше частота, тем на меньшем масштабе локализуются эти колебания [1]. В частности, низкочастотные колебания (в диапазоне до 50 Гц), характерные для первых мод продольных колебаний, охватывают фактически весь корпус и оказывают в определенной степени силовое воздействие на многие элементы РН.

Основным источником высокоамплитудной низкочастотной вибрации является жидкостный ракетный двигатель (ЖРД), входящий в контур динамической системы «упругий корпус – топливная магистраль – двигатель». Частота автоколебаний такой системы полностью определяется частотой собственных продольных колебаний корпуса ракеты – т. е. ее массовыми и жесткостными свойствами. Амплитуда колебаний по первым модам определяется как динамическими свойствами корпуса в отдельности, так и соотношениями между свойствами всех трех элементов колебательной системы в целом.

Масса ракеты на протяжении всего активного полета непрерывно уменьшается и это приводит к постоянной перенастройке свойств динамической системы. В этих условиях важной особенностью продольных низкочастотных колебаний РН является существенное изменение их форм во времени, что приводит к постепенному перераспределению амплитуд колебаний от одной части корпуса к другой вдоль её оси. Это является причиной изменения во времени структуры низкочастотной вибрации в конкретных поперечных сечениях. Таким образом, в зависимости от места расположения элементов систем двигательной установки по оси РН условия возбуждения колебаний могут существенно изменяться. Одними из наиболее критичных в части разрушения от низкоамплитудной вибрации являются трубопроводы относительной большой длины и малой изгибной жесткости, таких как трубопроводы системы питания топливом двигателей.

При неблагоприятном стечении факторов малоциклового ресурса трубопроводов в условиях сложного полигармонического вибрационного воздействия может значимо снизиться, что приведет к потере работоспособности ключевых для ракеты систем.

Указанное обстоятельство подчеркивает потребность в проведении комплексных исследований по выявлению условий появления высокоамплитудных низкочастотных колебаний в различных частях РН. Важным элементом рассматриваемой динамической системы является двигатель. Как известно, динамические свойства ЖРД с дожиганием гораздо интенсивней поддерживают продольные автоколебания ракеты, чем двигатели открытой схемы. Учитывая специфику отечественной школы ракетостроения, в которой двигатели закрытой схемы рассматриваются как наиболее перспективные, важно корректно учесть динамическое взаимодействие упругого корпуса РН с ЖРД.

В рамках данной статьи представлены результаты сопоставления теоретических исследований, проведенных на конечно-массовых динамических моделях с данными телеметрических измерений при летных испытаниях РН легкого класса.

В используемой комбинированной расчетной схеме (рис. 1) корпус первой ступени РН рассматривается как упругий стержень, характеризующийся жесткостью k и погонной массой m . Сосредоточенные массы M_i , описывают наиболее массивные элементы. В расчетной схеме таковыми являлись: двигатель первой ступени (M_1), горючее (M_2), окислитель (M_3) и вторая ступень с головной частью (M_4).

Рассмотренная модель позволяет решать основные задачи анализа условий появления высокоамплитудных колебаний в продольном направлении:

- определение форм колебаний, соответствующих первым двум модам собственных продольных колебаний корпуса РН;
- оценку запаса устойчивости по величине коэффициента демпфирования колебаний конструкции корпуса, с учетом динамических свойств топливной магистрали окислителя и двигателя.

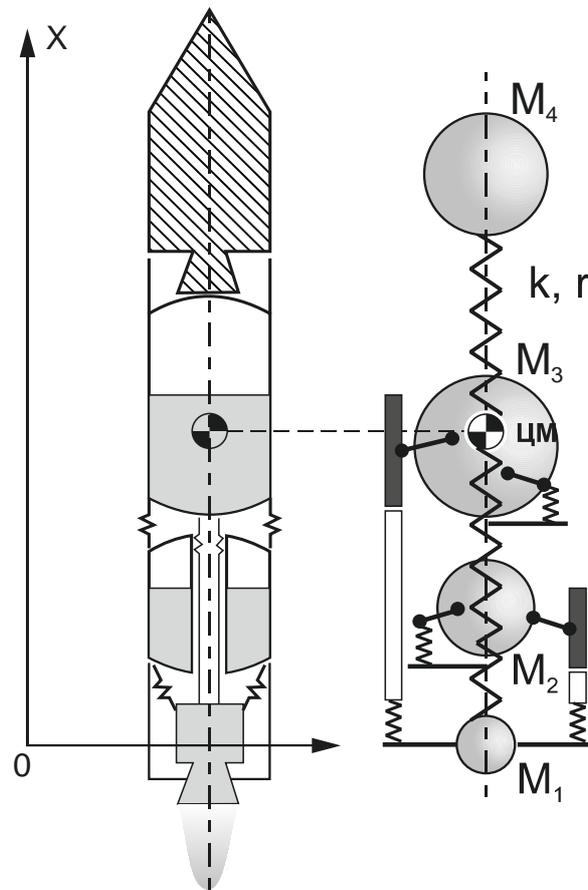


Рис. 1. Расчетная схема продольных колебаний корпуса ракеты-носителя легкого класса

Амплитуды вибрации в конкретной точке ракеты (поперечном сечении) определяются суммой колебаний от частных мод (тонов). Отдельные гармонические составляющие определяются произведением интенсивности колебаний на соответствующей частоте и некоторого коэффициента, учитывающего вид формы колебания.

Как известно, для гармонического процесса с определенной частотой f_i существует взаимно-однозначная зависимость между амплитудами виброускорения и виброперемещения:

$$A_{Wi} = \frac{du_i}{dt^2} = 4(\pi f_i)^2 A_{U_i} \sin(2\pi f_i t),$$

где A_{U_j} , A_{W_j} – максимальная амплитуда колебаний и виброускорения соответственно.

Общее выражение для оценки амплитуды колебаний в определенном сечении РН можно представить в виде:

$$A_{U_{i,j}} = \sum_i A_{U_j} \cdot K_{\Phi_{i,j}},$$

где $K_{\Phi_{i,j}}$ – коэффициент формы колебаний, нормированный относительно единицы и учитывающий снижение вибрации в тех сечениях, которые ближе к «узлам» колебаний.

Коэффициент формы численно равен значению функции, описывающей форму i -й моды колебаний в координате, соответствующей положению контролируемого сечения ракеты.

В процессе полета РН на этапе работы двигателя первой ступени, в условиях непрерывно снижающейся массы топлива происходит изменение положения центра масс, а также перераспределение массы между нижней и верхней частями ракеты как колебательной системы. Это способствует существенному изменению вида первых форм, соответствующих нижним модам продольных колебаний.

Анализ изменения во времени частот и форм собственных колебаний корпуса РН (рис. 2) позволяет выявить наиболее значимые характеристики колебаний её основных элементов. Так для РН легкого класса, имеющую сравнительно простую компоновочную схему достаточно принимать во внимание три-четыре основные составные части: хвостовой отсек первой ступени; межбаковый отсек (условная область второй четверти по длине); верхний шпангоут бака окислителя (условная область третьей четверти по длине); элементы второй ступени.

Анализ результатов математического моделирования был ограничен первыми двумя модами, вносящими основной вклад в амплитуду результирующей вибрации. Так, на рис. 2 в правом верхнем углу показана диаграмма, отражающая эволюцию изменения первой формы продольных колебаний, а нижняя диаграмма – второй.

На графиках жирными линиями показаны формы колебаний, соответствующие началу и окончанию работы двигателя первой ступени.

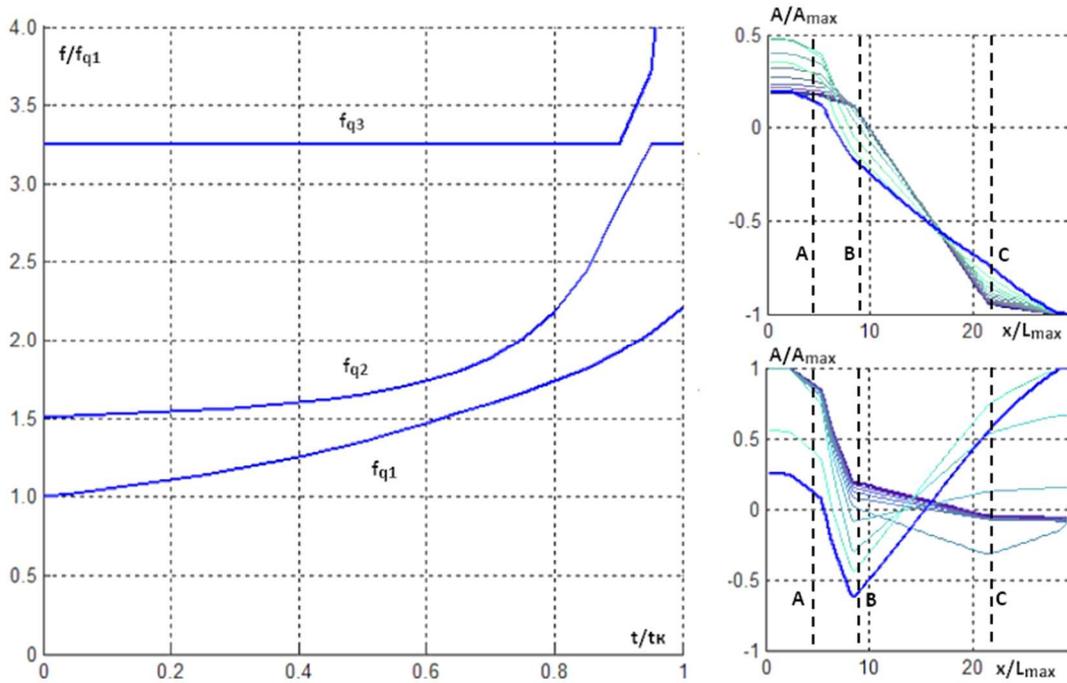


Рис. 2. Изменение первой и второй форм продольных колебаний при работе двигателя первой ступени РН (результаты моделирования)

Как видно из представленных графиков (см. рис. 2) наиболее сильно характер вибрации изменяется для второй моды колебаний. В частности, для точек А и В, соответствующих второй ступени и верхнему шпангоуту бака окислителя (ВШБО), реализуются взаимно обратные условия. При максимуме амплитуды вибрации в районе второй ступени вибрация на ВШБО оказывается минимальной.

Характер первой моды колебаний предопределяет повышение амплитуды вибрации в хвостовой части РН в относительно ее головной части.

Столь сложный вид взаимосвязи между частотами и формами продольных колебаний корпуса РН наглядно иллюстрирует спектрограммы, полученные в результате спектрально-временного анализа параметров вибрации, зафиксированных в процессе полета РН легкого класса. На рис. 3 показаны спектрограммы, полученные на основе обработки данных вариации во времени осевой перегрузки, отражающих характер изменения частот собственных продольных колебаний корпуса РН легкого класса на участке работы первой ступени. Темные области на спектрограмме соответствуют локальным максимумам вибрации на соответствующих частотах и в целом формируют структуру частотных характеристик собственных продольных колебаний корпуса ракеты. Пунктиром отмечены области на спектрограмме, где амплитуды колебаний малы.

Окружностями на графике отмечены характерные точки сближения смежных частот собственных продольных колебаний.

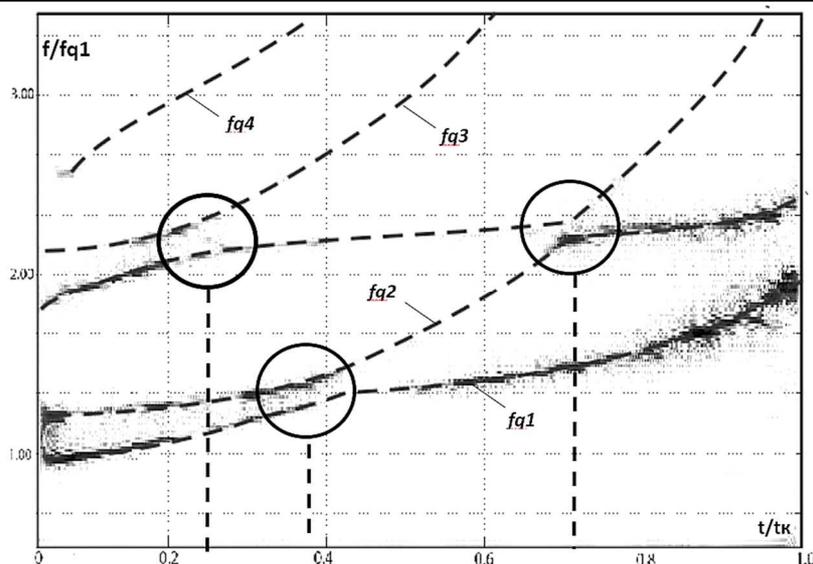


Рис. 3. Спектрограмма виброускорения корпуса РН на этапе работы первой ступени

Соотношение жесткости конструкции в головной части ракеты (область полезного груза и вторая ступень) центральной и хвостовой, а также массы топлива в баках первой ступени определяет характер изменения частот f_{q1}, f_{q2}, \dots и форм первых мод продольных колебаний по времени полета.

Учет изменения во времени первых двух форм продольных колебаний позволяет для соответствующего сечения РН оценить возможность появления высокоамплитудных колебаний на соответствующей частоте. Пример существенного отличия амплитуд виброускорения на одних и тех же частотах в зависимости от места измерения на борту РН приведен на рис. 4.

В верхней части иллюстрации показана схема РН с указанием мест контроля вибрации.

Так, исходя из данных, представленных на рис. 4, можно отметить, что в первые секунды полета РН замер вибрации в точке 1 демонстрирует наличие высокоамплитудных колебаний на частотах первых двух мод. Это полностью согласуется с расчетными данными по формам колебаний, представленными выше (см. рис. 2).

Условия возбуждения первых двух мод колебаний корпуса РН определяют вполне конкретные свойства динамической системы «упругий корпус-топливная магистраль-двигатель». Учитывая особенность динамического взаимодействия отдельных элементов указанной системы можно провести её декомпозицию и выделить наиболее значимые для практики характеристики её элементов.

Известно, что повышение вибрации в продольном направлении характерно для случая потери устойчивости рассматриваемой системы [2]. При этом для современных РН вероятность выхода за границу устойчиво-

сти и появления бесконтрольно-возрастающей вибрации по причине проявления так называемого *рого*-эффекта представляется малой. Применяемые в современных РН системы демпфирования позволяют эффективно разделять частоты колебаний корпуса и собственную частоту колебаний жидкости в расходной магистрали. Таким образом условий для появления резонансного усиления колебаний корпуса при приближении частот колебаний не происходит.

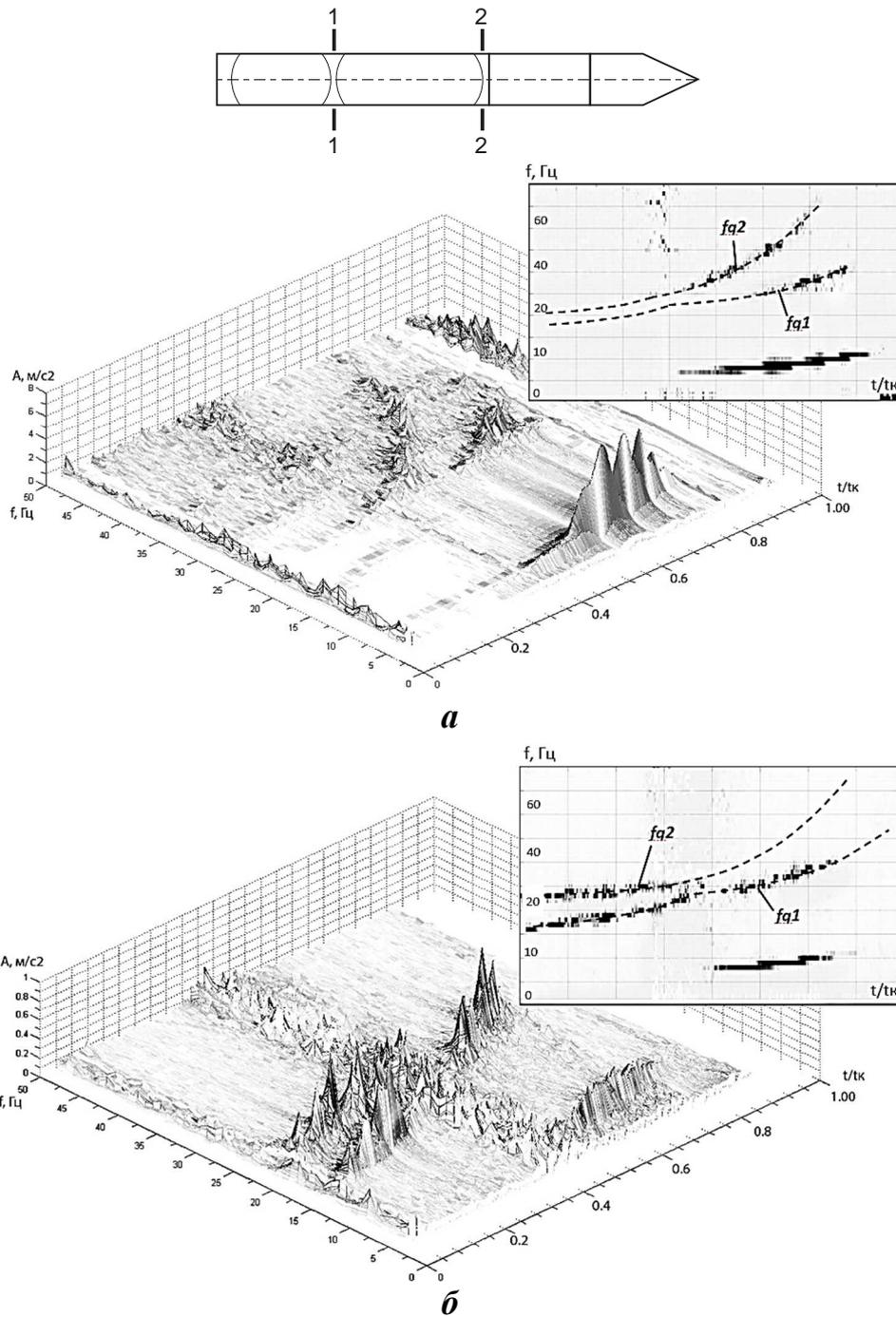


Рис. 4. Спектрограммы виброускорения в различных точках на корпусе РН легкого класса: а - межбаковый отсек; б - верхний шпангоут бака окислителя

Вместе с тем, как отмечено в работе [3], существует опасность потери устойчивости работы двигателя в составе РН, когда появляется дополнительная обратная связь, замыкающая все элементы динамической системы. При таком явлении рост амплитуд колебаний в основном проявляется на частоте первой моды колебаний. Условием проявления такого резонансного взаимодействия корпуса с двигателем является сближением частот собственных колебаний корпуса и частоты максимума амплитудно-частотной характеристики ЖРД по давлению в камере в функции пульсации давления в магистрали окислителя. Ключевым здесь выступает частотная характеристика ЖРД и, в первую очередь, – двигателей с дожиганием, АЧХ которого близка по форме характеристике гармонического осциллятора с затуханием [3].

Несмотря на то, что частотные характеристики ракеты и двигателя на стадии доводочных испытаний стараются максимально согласовать, существующая система контроля при создании товарных образцов ЖРД не обеспечивает полный и достоверный контроль динамических свойств каждого из них.

Это позволяет отметить, что имеющийся фактический разброс динамических свойств ЖРД, используемых на первой ступени РН, формирует случайную составляющую в запасе продольной устойчивости ракеты. Связанный с этим разброс в амплитудах низкочастотных колебаний корпуса РН на частотах, соответствующих первым двум модам, в определенных условиях может стать причиной появления значительной по амплитуде вибрации в хвостовой и головной частях РН в начальный и конечный период работы первой ступени.

Вывод

Таким образом, проведенный анализ изменения во времени частот и форм продольных колебаний корпуса РН в полете позволяет отметить существенное различие в характере вибрационного нагружения элементов двигательных установок, расположенных в различных местах вдоль продольной оси.

Так проведенный анализ условий возбуждения вибрации РН указывает на существенное изменение соотношения между амплитудами колебаний различных частей её корпуса в процессе работы двигателя первой ступени. Типичным для многих РН легкого класса является то, что для первых секунд полета максимальные перемещения на частоте первой моды колебаний реализуются в хвостовой части корпуса, а для второй моды – рост амплитуды перемещений характерен только для головной части. В конце работы первой ступени РН хвостовой отсек начинает раскачиваться со значительными амплитудами в основном на частоте первой моды колебаний. Таким образом, для корректной оценки амплитуд колебаний корпуса на соответствующих частотах по данным телеметрических измерений необходимо учитывать специфику форм продольных колебаний для конкретной РН.

Условием возрастания амплитуд первых гармоник продольных колебаний до опасных значений является приближение частот собственных колебаний к частоте максимума АЧХ ЖРД по входному давлению компонентов топлива при условии использования двигателей с дожиганием генераторного газа.

Список литературы

1. Рабинович Б.И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 416 с.
2. Колесников К.С. Динамика ракет: учебник для вузов. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 520 с.
3. Натанзон М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты. – М.: «Машиностроение», 1977. 208 с.
4. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей/ Б.Ф. Гликман. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 296 с.

Перфильев Александр Сергеевич, канд. техн. наук, зам. нач. кафедры, corpis@list.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Султанов Алексей Эдыгарович, канд. техн. наук, ст. преподаватель, corpis@list.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Герасименко Сергей Юрьевич, соискатель, corpis@list.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

CONDITIONS FOR THE OCCURRENCE OF HIGH-AMPLITUDE LOW-FREQUENCY VIBRATIONS OF THE BODY OF THE ROCKET, REDUCING THE RELIABILITY OF THE PROPULSION UNITS

A.S. Perfiliev, A.E. Sultanov, S.Yu. Gerasimenko

The article presents the main results of theoretical and experimental studies to identify the excitation patterns of high-amplitude low-frequency longitudinal vibrations in different parts of the body of the carrier rockets, as well as their relationship with the vibration amplitudes. The results of approbation of course-mass dynamic model according to the analysis of telemetry data obtained from the results of flight tests of the carrier rocket of an easy class. Observed determinants of the stochastic nature of the excitation of longitudinal oscillations in the interaction of elastic missile body and the amplitude-frequency characteristics of the engine, contributing to an increase in amplitude of vibration.

Key words: longitudinal vibrations of large amplitude low frequency vibration, fatigue failure of piping, booster, and propulsion systems.

Perfil'ev Aleksandr Sergeevich, candidate of technical sciences, Deputy head of Department, corplic@list.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Sultanov Alexey Edigarovich, candidate of technical sciences, senior lecturer, corplic@list.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Gerasimenko Sergey Yuryevich, candidate, corplic@list.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military space Academy named A.F. Mozhaisky

УДК 629.7.062.2

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ И ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА АДАПТИВНОГО АВИАЦИОННОГО КАТАПУЛЬТНОГО УСТРОЙСТВА

А.С. Алексеенков, Ф.С. Беклемишев, В.И. Лалабеков, М.Н. Правидло,
С.Л. Самсонович, К.М. Тихонов

Представлены результаты исследования процессов, протекающих в математической модели пиротехнического газо-гидравлического источника энергии при последовательной и параллельной его работе с толкателем в составе катапультичного устройства летательного аппарата. Проведён сравнительный анализ характеристик устройства катапультирования груза и дана качественная и количественная оценка рабочих параметров.

Ключевые слова: пиротехнический газо-гидравлический источник энергии, катапультичное устройство сброса груза, толкатель, газо-гидравлический преобразователь энергии вытеснительного типа.

В работах [1, 2] представлены результаты разработки математической модели пиротехнического газо-гидравлического источника энергии (ПГГИЭ) при последовательной и параллельной его работе с толкателем в составе авиационного адаптивного катапультичного устройства (ААКУ), упрощенная схема которого показана на рис. 1. Там же показано, что математическая модель (рис. 3, а, б [1]) позволяет решать задачи параметрического анализа и синтеза на этапе проведения проектных работ по построению АКУ.

Эффективность работы математической модели в оценке процессов, протекающих в АКУ, проверена на примере с использованием следующих исходных данных: $u_1 = 0,012$ – чувствительность скорости горения

топлива к температуре эксплуатации; $\rho_T = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$ – плотность топлива; $S = 14000 \text{ см}^2$ – поверхность горения топлива; $\nu = 0,62$ – показатель степени в законе горения топлива; $V_G = 800 \text{ см}^3$; $V_{Ж} = 232 \text{ см}^3$ – объемы газовой и жидкостной полостей; $R = 4000 \text{ кг} \cdot \text{см/кг} \cdot \text{°K}$ – универсальная газовая постоянная; $T = 1400 \text{ °K}$ – температура газа; $\rho = 0,867 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$ – плотность рабочей жидкости; $E = 13000 \text{ кг/см}^2$ – модуль упругости рабочей жидкости; $Q_{Ж}(t)$ – объемный расход жидкости в толкателе; $Q_T(t)$ – объемный расход топлива; $A = 11,6 \text{ см}^2$ – эффективная площадь поршня толкателя; $h = 20 \text{ см}$ – ход толкателя; $m = 420 \text{ кг}$ – масса сбрасываемого объекта; $n = \text{минус } 1...5$ – перегрузка; $g = 980 \text{ см/с}^2$ – ускорение свободного падения.

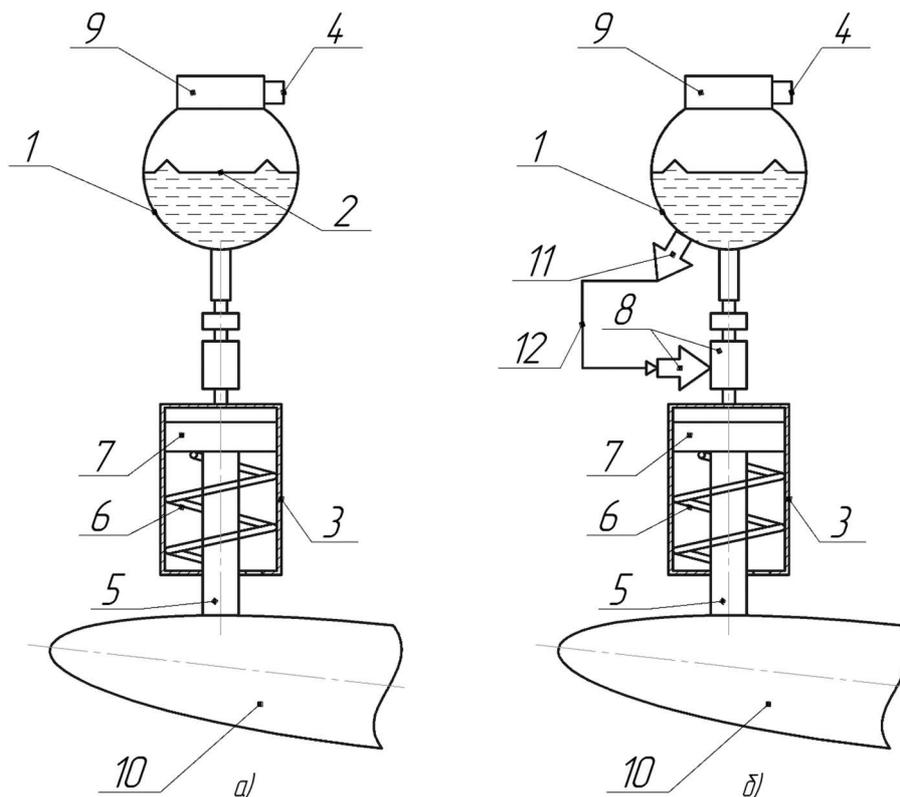


Рис. 1. Принципиальная схема КТПУ с параллельной (а) и последовательной (б) работой ПГГИЭ и толкателя: 1 – капсула с газом и жидкостью; 2 – диафрагма; 3 – силовой цилиндр; 4 – пиропатрон с форсажным зарядом; 5 – шток; 6 – возвратная пружина; 7 – поршень (толкатель); 8 – пиро- или электро- затвор; 9 – клапан сброса давления газа; 10 – катапультируемый объект; 11 – сигнализатор давления; 12 – канал системы управления затвором 8

Результаты моделирования на примере параллельного взаимодействия источника энергии и толкателя (ТЛК) при непрерывном течении процессов, протекающих в ПГГИЭ и ТЛК для давления $P_{max}=350 \text{ кГ/см}^2$, представлены на рис. 2.

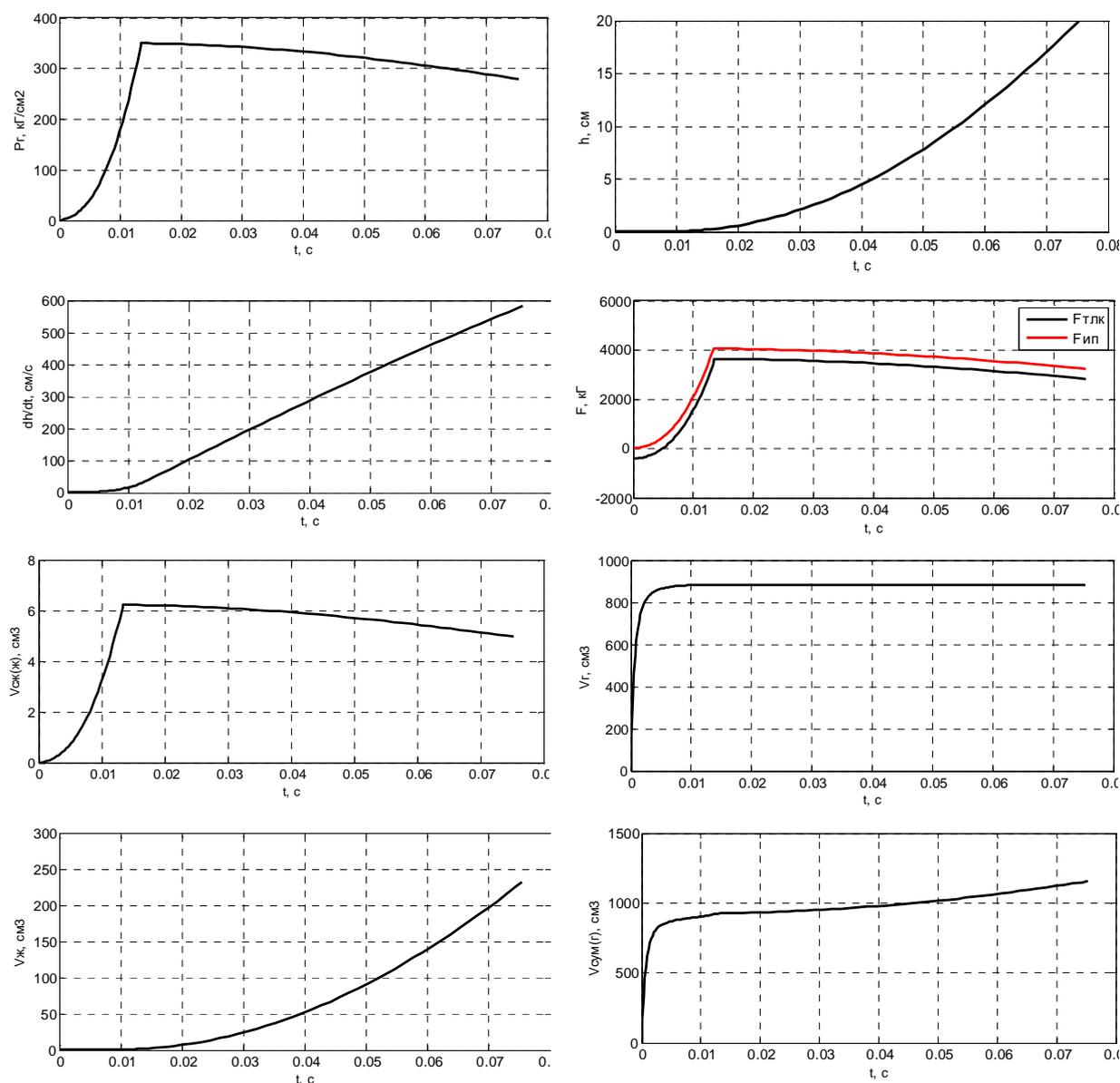


Рис. 2. Графики параметров КТПУ при параллельной работе ПГГИЭ и ТЛК для $P_{max}=350 \text{ кГ/см}^2$, переходные процессы изменения $P(t)$, $V_t(t)$, $V_3(t)$, $V_ж(t)$, $V_{сум}(t)$, $h(t)$, dh/dt , $F(t)$

Результаты моделирования на примере последовательного взаимодействия источника энергии и толкателя при раздельном течении процессов, протекающих в ПГГИЭ и ТЛК для давления $P_{max} = 350 \text{ кГ/см}^2$, представлены на рис. 3.

В результате реализуется непрерывное решение задачи с участием всех элементов КТПУ: ПГГИЭ + ТЛК + МРТГ (механизм расфиксации толкателя и груза), которые позволяют в полном объеме анализировать и синтезировать процессы моделирования.

Обобщённая структурная схема математической модели, позволяющая произвести оценку действия отрицательной перегрузки на рабочие параметры КТПУ при параллельной работе ПГГИЭ и ТЛК, представлена на рис. 4. Для оценки воздействия отрицательных перегрузок n на параметры системы параллельно работающих ПГГИЭ и ТЛК использована обобщённая математическая модель, общий вид которой представлен на рис. 4 для $P_{max}=350\text{кГ/см}^2$ и $P_{max}=500\text{кГ/см}^2$.

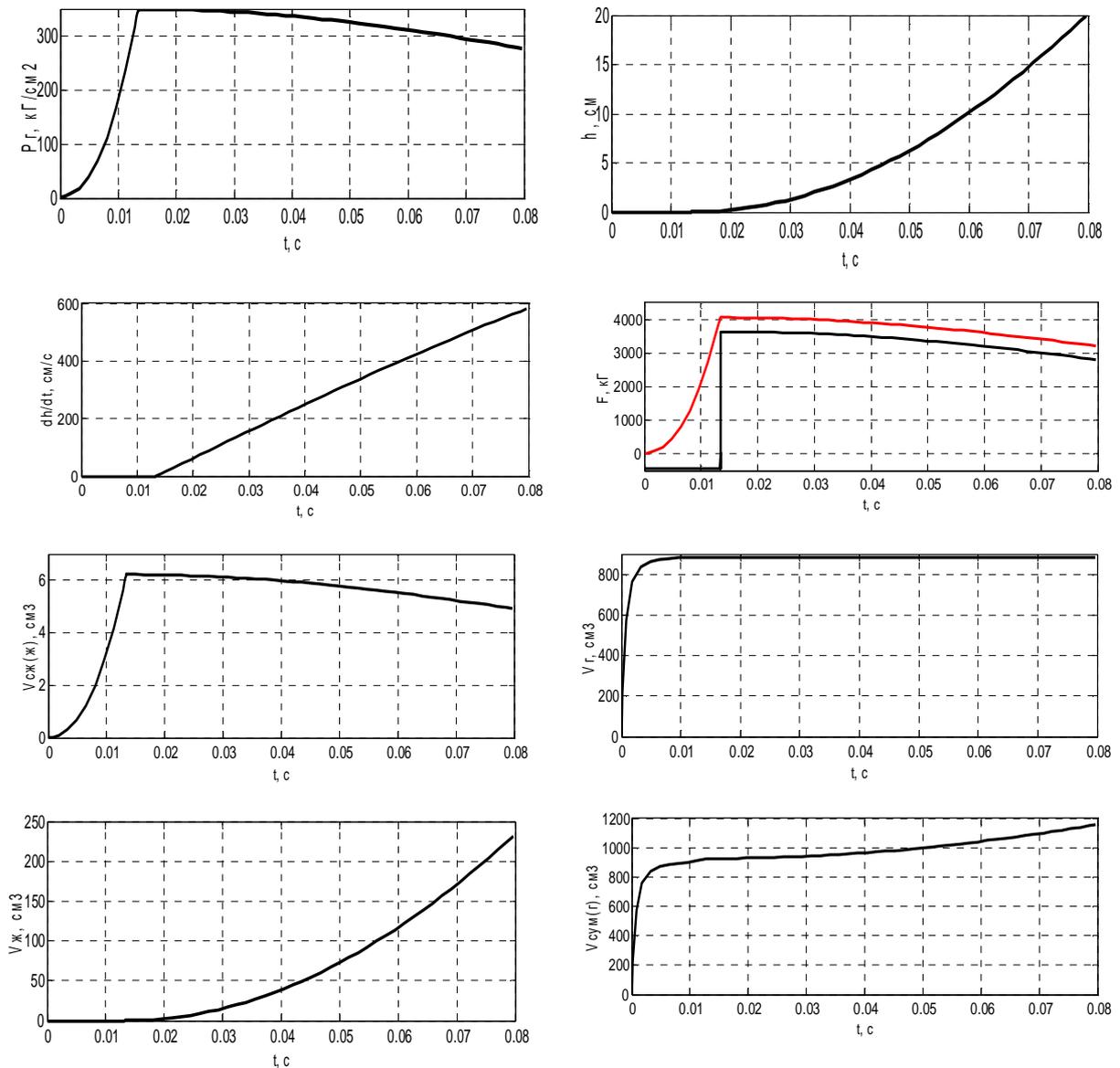


Рис. 3. Графики параметров КТПУ $P(t)$, $V_{\Gamma}(t)$, $V_3(t)$, $V_{\text{Ж}}(t)$, $V_{\text{СУМ}}(t)$, $h(t)$, dh/dt , $F(t)$ при последовательной работе ПГГИЭ и ТЛК для $P_{max}=350\text{кГ/см}^2$

На рис. 4 блок 1 является подсистемой, структура которой раскрыта на рис. 3, а [1]: блок 1 параметризован для перегрузки $n = \text{минус } 1$, а блок 2 – для $n = \text{минус } 5$.

Результаты моделирования процессов, протекающих в газовой, гидравлической и механической частях АКУ для $P_{max}=350\text{кГ/см}^2$ и $P_{max}=500\text{кГ/см}^2$ при действии отрицательных перегрузок $n = \text{минус } 1$ и $n = \text{минус } 5$ представлены на рис. 5, 6.

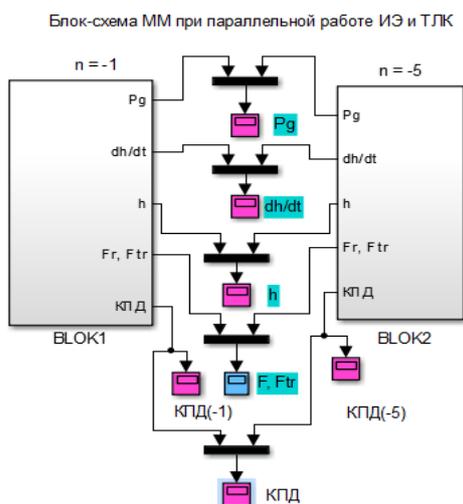


Рис. 4. Блок-схема обобщённой математической модели для исследования процессов в КТПУ с учётом параллельной работы ПГГИЭ и ТЛК при переменной перегрузке n

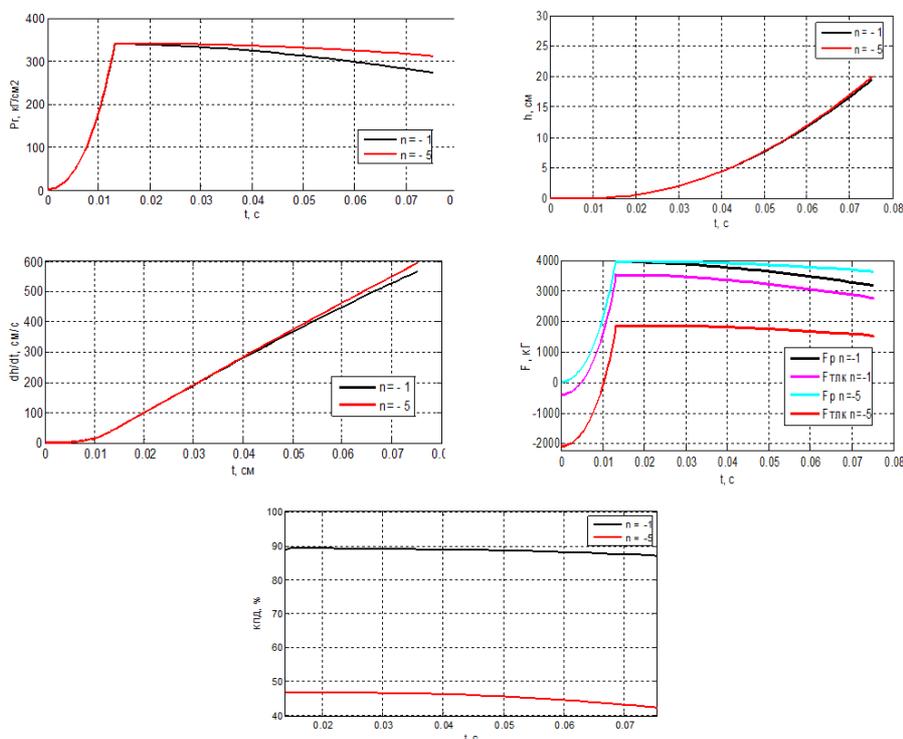


Рис. 5. Переходные процессы изменения параметров ПГГИЭ и ТЛК $P(t)$, $h(t)$, dh/dt , $F(t)$, $КПД(t)$ при действии n для $P_{max}=350\text{кГ/см}^2$

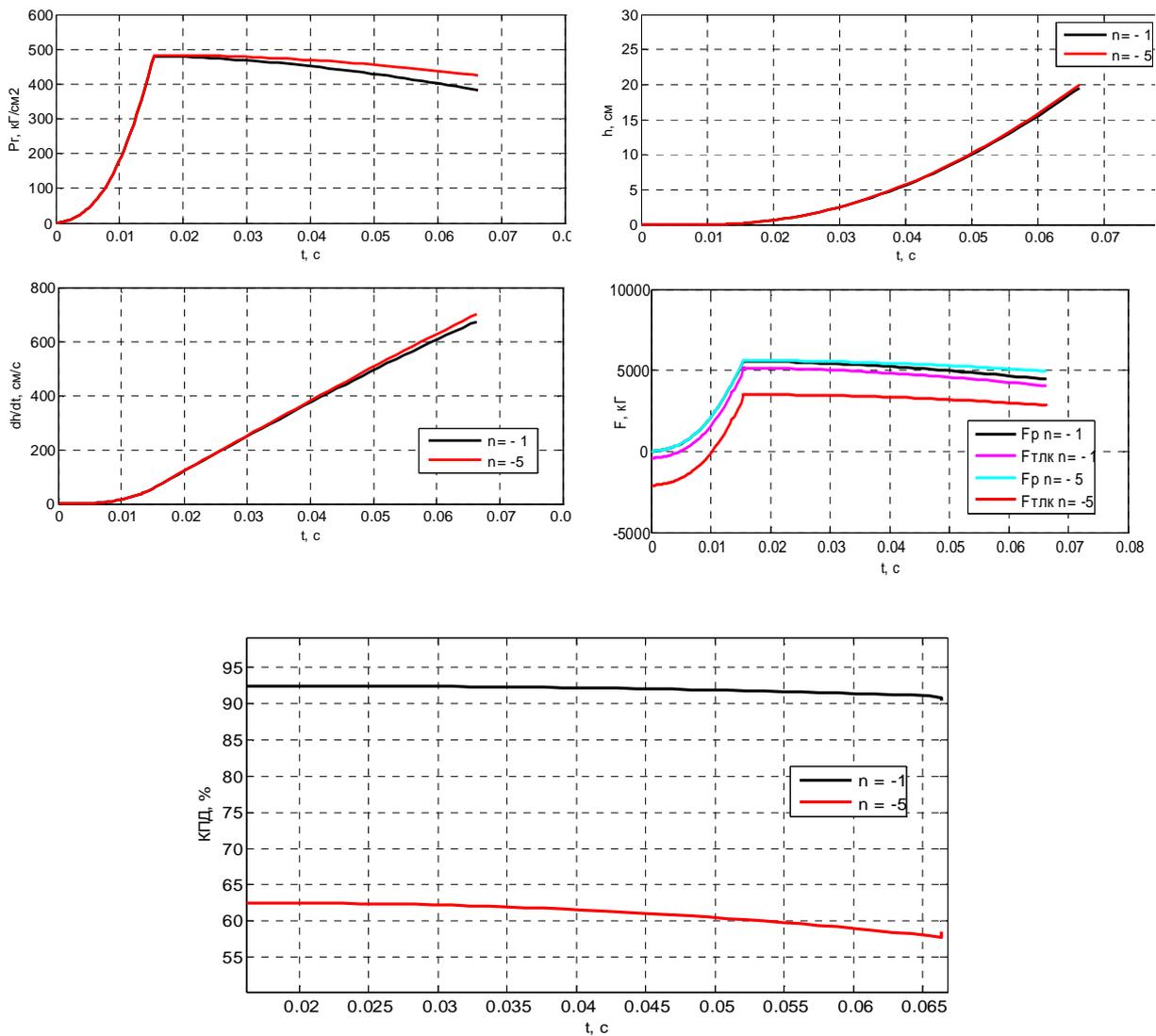


Рис. 6. Переходные процессы изменения параметров ПГГИЭ и ТЛК $P(t)$, $h(t)$, dh/dt , $F(t)$, КПД(t) при действии n для $P_{max}=500\text{кГ/см}^2$

Обобщённая структурная схема математической модели, позволяющая произвести оценку действия отрицательной перегрузки на рабочие параметры КТПУ для последовательной работы ПГГИЭ и ТЛК при $P_{max}=350\text{кГ/см}^2$ и $P_{max}=500\text{кГ/см}^2$, представлена на рис. 7. Для оценки воздействия отрицательных перегрузок n на параметры системы последовательно работающих ПГГИЭ и ТЛК использована обобщённая математическая модель, для которой $P_{max}=350\text{кГ/см}^2$. На рис. 7 блок 3 является подсистемой, структура которой представлена на рис. 3, б [1]: блок 3 для $n = \text{минус } 1$, а блок 4 – для $n = \text{минус } 5$.

Результаты моделирования процессов, протекающих в газовой, гидравлической и механической частях КТПУ для $P_{max}=350\text{кГ/см}^2$ и $P_{max}=500\text{кГ/см}^2$ при действии отрицательных перегрузок $n = \text{минус } 1$ и $n = \text{минус } 5$ представлены соответственно на рис. 8 и 9.

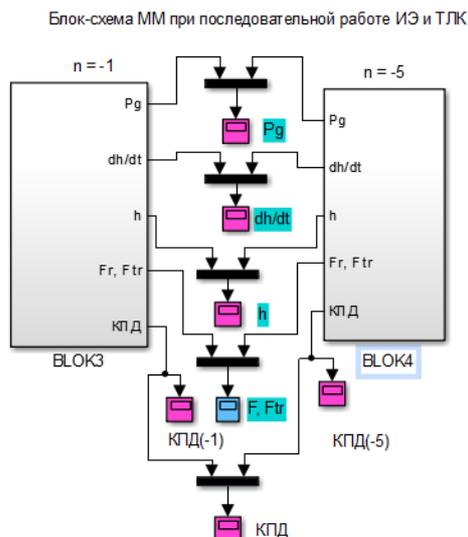


Рис. 7. Блок-схема обобщённой математической модели с учётом последовательной работы ПГГИЭ и ТЛК при различных перегрузках n

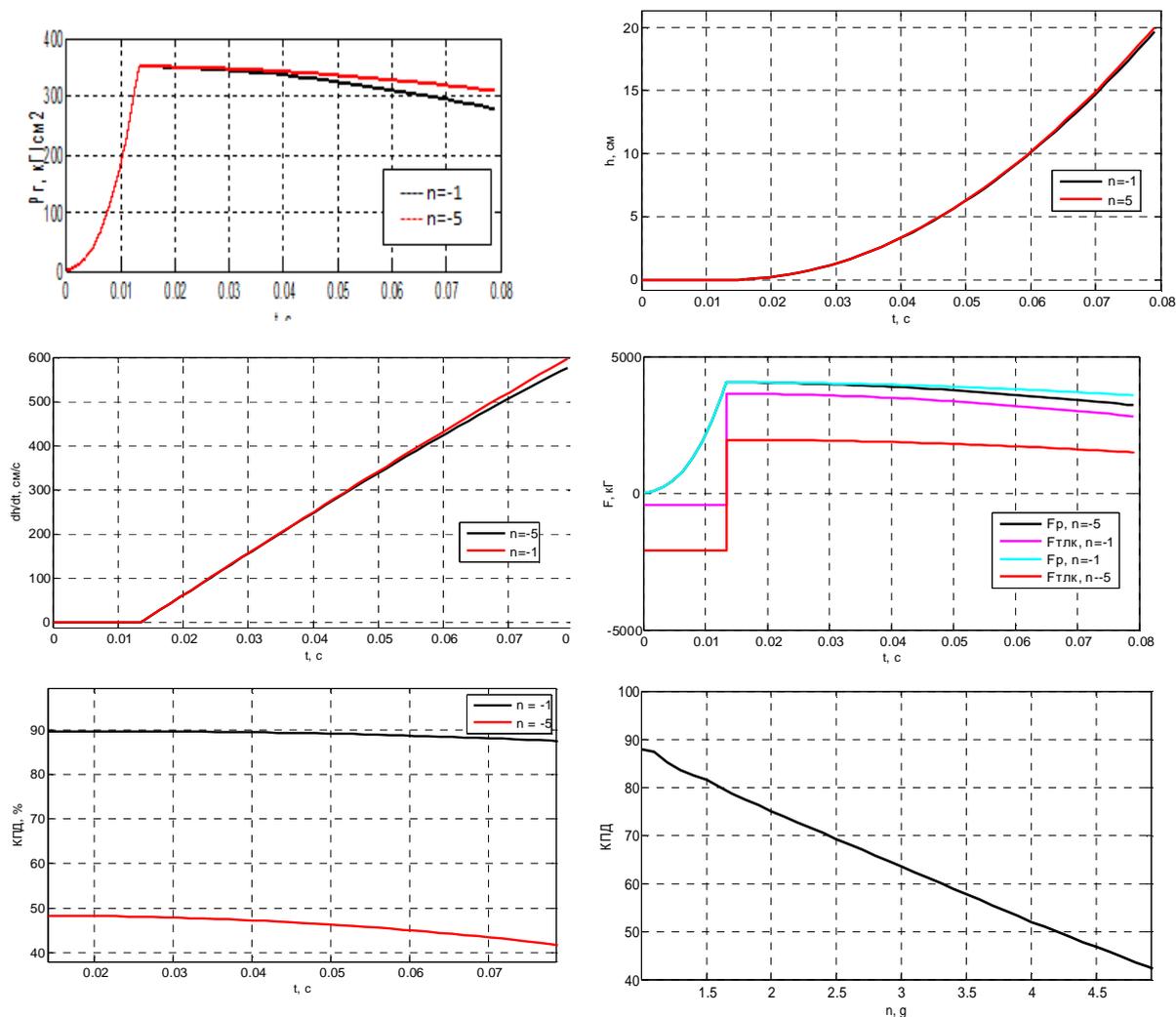


Рис. 8. Переходные процессы изменения параметров ПГГИЭ и ТЛК $P(t)$, $h(t)$, dh/dt , $F(t)$, $КПД(t)$, $КПД=f(n)$ при действии n для $P_{max}=350\text{кг/см}^2$

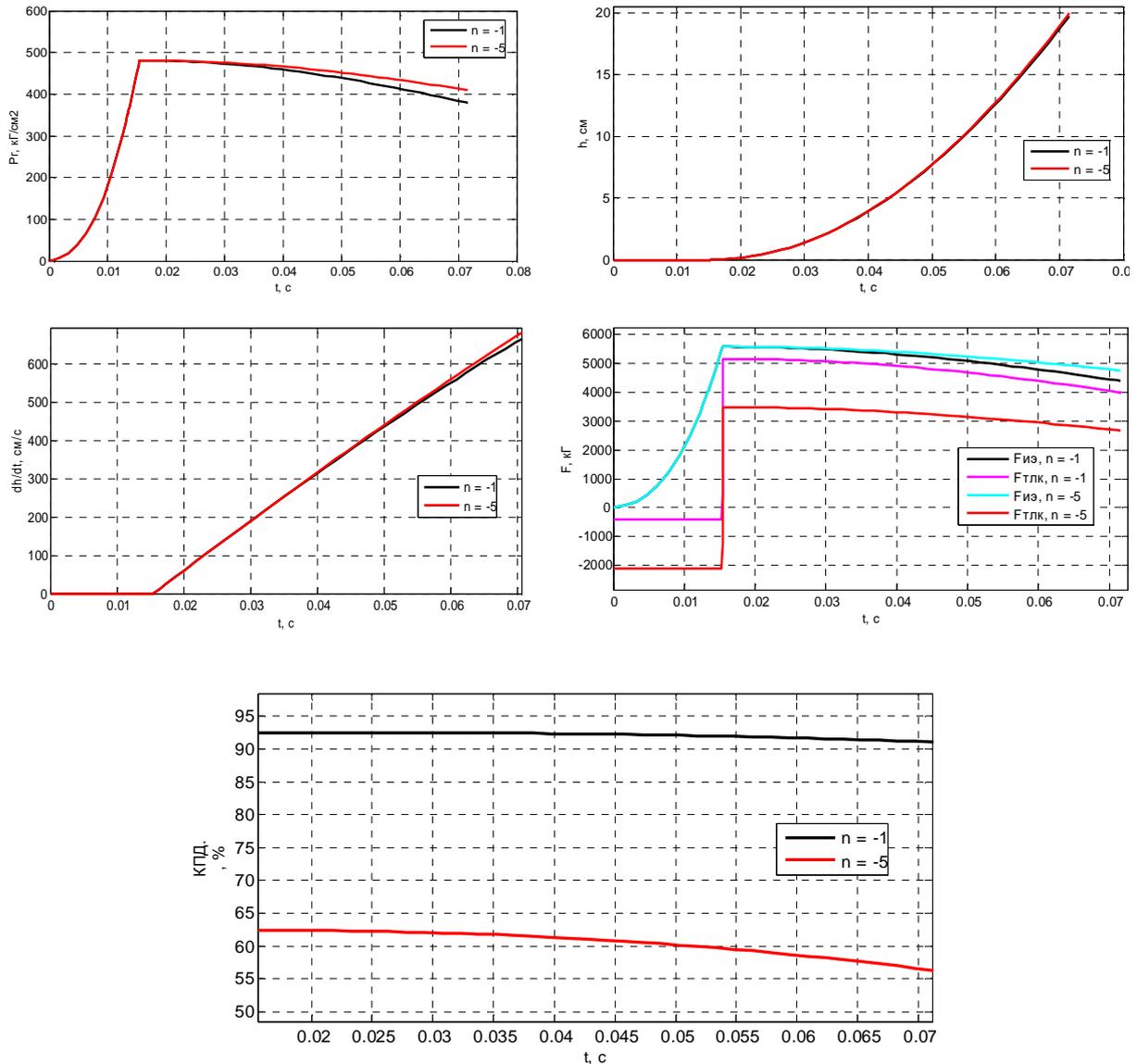


Рис. 9. Переходные процессы изменения параметров ПГГИЭ и ТЛК $P(t)$, $h(t)$, dh/dt , $F(t)$, $\eta(t)$ при действии n для $P_{max}=500$ кГ/см²

Ниже представлены результаты сравнительного анализа двух вариантов источников энергии, построенных по схеме последовательной и параллельной работе ПГГИЭ с ТЛК. Отличие указанных схем друг от друга состоит в том, что в последовательном варианте движение толкателя (это обеспечивается системой управления) начинается после достижения в газовой полости ПГГИЭ давления P_{max} , в то время как в параллельном варианте разряда источника и движение толкателя начинается одновременно после подачи команды на запуск ПГГИЭ.

Как следует из данных рис. 10, энергетические потери в силовом тракте последовательно работающих ПГГИЭ и ТЛК незначительно ниже энергетических потерь параллельно работающих ПГГИЭ и ТЛК. Отмечен-

ное обусловлено тем фактом, что при одновременной (параллельной) работе ПГГИЭ и ТЛК затягивается по времени выход на уровень максимального давления ПГГИЭ из-за движения толкателя, в результате которого формируется переменный объём газовой полости капсулы, увеличивая указанное его.

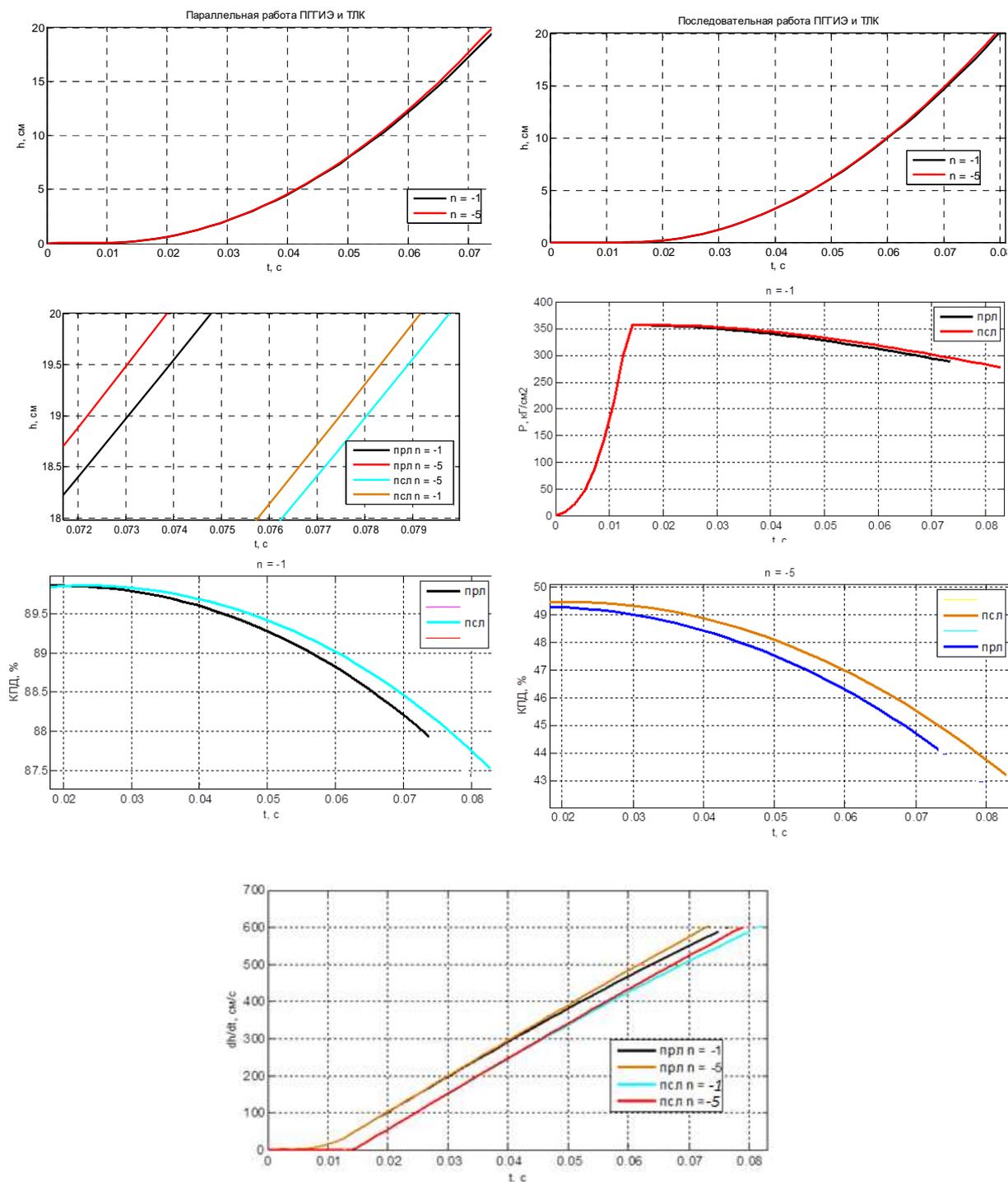


Рис. 10. Сравнительные процессы изменения параметров ПГГИЭ и ТЛК при действии n для $P_{\text{max}}=350\text{кГ}/\text{см}^2$

Кроме того, при фиксированной массе заряда пиротехнического средства, выбранной из требований работы заряда в условиях неизменной величины начального объёма газовой полости вытеснителя (последовательная работа ПГГИЭ при неподвижном состоянии ТЛК), максимальное давление в ААКУ не достижимо для переменного объёма в схеме параллельной работы ПГГИЭ и ТЛК. При последовательной работе ПГГИЭ и ТЛК пиропатрон работает на минимальный объём газовой полости капсулы, заполняя её до максимального давления за минимальное время ($\tau_{послед.}^{350} = 0,0132c$). Максимальное давление в параллельной схеме работы достигает величины $P_{max} = 348кГ / см^2$ ко времени $\tau_{парал}^{348} = 0,0134c$.

Следует отметить, что проведённые выше исследования проведены с использованием математической модели при допущении мгновенного достижения температуры рабочего тела в капсуле ПГГИЭ. Указанное допущение обусловлено существенной величиной массового секундного прихода газа (больше 10 кг/с), поступающего от форсажного заряда, в малый объём (~800см³) газовой камеры. Для подтверждения достоверности принятого допущения ниже приведена сравнительная оценка процессов в математической модели при температуре $T=1400\text{ }^{\circ}K=Const.$ и математической модели, в которой температура является функцией давления согласно данным работы В.М. Бобылёва [3] и для твёрдого топлива описывается выражением $T=f(P)$, аппроксимируемого полиномом третьей степени в виде:

$$T(P) = 504,951 + 13,52 \cdot P - 0,133 \cdot P^2 + 1,487 \cdot 10^{-3} \cdot P^3.$$

В схеме математической модели (рис. 11) выражение $T=f(P)$ формируется типовыми блоками, взятыми из библиотеки Simulink, представленном в виде:

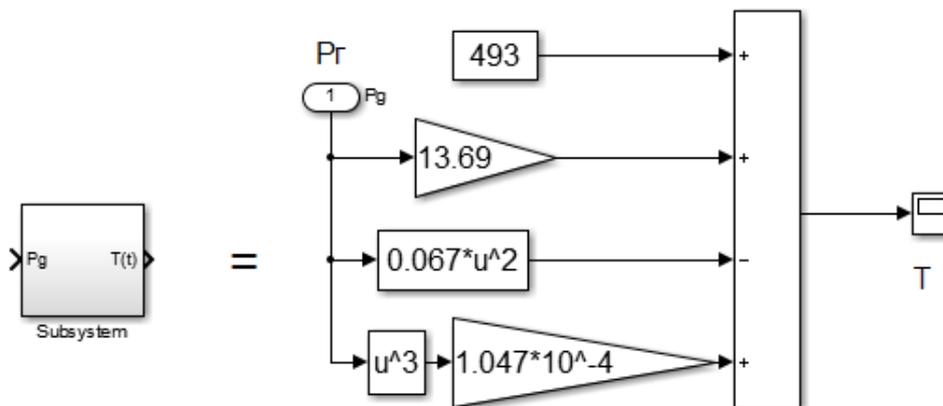


Рис. 11. Блок схема модели Бобылёва В.М. [2] воспроизведения зависимости $T=f(P)$

Преобразованные с учётом зависимости $T=f(P)$ ММ для последовательной и параллельной работы ПГГИЭ и ТЛК были интегрированы в математические модели последовательной и параллельной работы ПГГИЭ с толкателем согласно структурам, представленным в [1] на рис. 3, а, б.

Полученные результаты моделирования процессов подтверждают качественное и количественное соответствие характера их протекания. При этом, время движения ТЛК при последовательной и параллельной работе для $T=Const$ и $T=f(P)$, представленные в таблице, отличаются друг от друга с погрешностью, не превышающей ~ 5%.

Сравнение времени движения ТЛК

Вариант использования T	Время движения ТЛК, с	
	Последовательная работа	Параллельная работа
$T = Const$	0,074	0,072
$T = f(P)$	0,078	0,075

Анализ результатов моделирования показал следующее:

1. Для принятых исходных данных, используемых при математическом моделировании, показано, что время движения груза при параллельной работе ПГГИЭ и ТЛК меньше, чем время движения груза при последовательной работе ПГГИЭ и ТЛК на 7,5%, и составляет соответственно 0,074 с и 0,079 с.

2. Показано, что для принятых исходных данных время наполнения газом газовой капсулы АКУ до достижения максимального давления с учётом движения при работе толкателя составляет

$$\bar{\tau}_{P_{\max}} = \frac{\tau_{P_{\max}}}{\tau_T} \cdot 100\% = \frac{0.013}{0.079} \cdot 100\% = 16\% \text{ от полного времени выполнения задачи сброса груза.}$$

ния задачи сброса груза.

3. Определено, что на момент сброса груза выходные кинематические параметры ААКУ соответствуют допустимым требованиям, оговорённым в исходных данных, и составляют: $\tau_T = 0.079\text{с}$ – время движения толкателя; $h = 20\text{ см}$ – ход толкателя; $dh/dt = 600...700\text{ см/с}$ (но $T3 \geq 550\text{ см/с}$) – скорость толкателя в момент сброса груза; $F = 2500...5000\text{ кг}$ - разброс сил в диапазоне действующих перегрузок $n = \text{минус } 1... \text{минус } 5$.

4. Показано, что влияние отрицательных перегрузок на груз снижает действующее со стороны груза на толкатель усилие, являясь попутным, увеличивая скорость толкателя в момент сброса на 5...10% при переходе

перегрузки с $n_1 = \text{минус } 1$ на $n_2 = \text{минус } 5$. Увеличение отрицательных перегрузок снижает скорость падения давления газа, повышая располагаемое усилие на поршне толкателя.

5. Увеличение отрицательных перегрузок понижает КПД системы (рис. 8) вследствие действия попутной нагрузки на толкатель при сохранении мощности источника энергии, выбранной из условия отсутствия действия перегрузки. Действие попутной нагрузки на толкателе обеспечивает формирование дополнительного источника энергии, действующего параллельно ПГГИЭ.

6. Полученные в результате моделирования процессы согласуются с экспериментальными данными, приведёнными в работе [4].

7. Подтверждена достоверность математической модели для двух вариантов использования выражений температуры в структуре АКУ: $T = \text{Const}$ и $T = f(P)$. Показано, что время движения ТЛК при последовательной и параллельной работе для $T = \text{Const}$ и $T = f(P)$ подтверждают их соответствие их ММ с погрешностью, не превышающей $\sim 5\%$.

Заключение

Разработанная математическая модель катапультного устройства сброса груза может быть рекомендована для проведения анализа и параметрического синтеза на этапе проектно-конструкторских работ по созданию перспективных образцов АКУ.

Список литературы

1. Алексеенков А.С., Беклемищев Ф.С., Лалабеков В.И., Правидло М.Н., Самсонович С.Л., Тихонов К.М. Построение математической модели пиротехнического газо-гидравлического источника энергии авиационного адаптивного катапультного устройства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 7. С. 376 – 384.
2. Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И., Чуканов К.П. Математические модели систем пневмоавтоматики: учебное пособие. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 294 с.
3. Бобылёв В.М. Ракетный двигатель твёрдого топлива как средство управления движением ракет. М.: Машиностроение, 1992. 161 с.
4. Круглов Ю.А. Системы катапультирования ракет / Ю.А. Круглов [и др.]; Балт. гос. техн. ун-т. СПб, 2010. 184 с.

Алексеенков Артём Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, atovus@yandex.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИ),

Беклемищев Филипп Сергеевич, аспирант, philipmsk@gmail.com, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИ),

Лалабеков Валентин Иванович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, lalabekov.valentin@yandex.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИУ),

Правидло Михаил Натанович, д-р техн. наук, профессор, info@vypelmkb.com, Россия, Москва, АО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова»,

Самсонович Семён Львович, д-р техн. наук, профессор, samsonovich40@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИУ),

Тихонов Константин Михайлович, канд. техн. наук, доцент, ktixo@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИИУ)

THE RESULTS OF A MATHEMATICAL SIMULATION OF THE POWER SOURCE AND ACTUATOR OF ADAPTIVE AIRCRAFT EJECTION LAUNCHER

A. S. Alekseenkov, F.S. Beklemishev, V. I. Lalabekov, M. N. Pravidlo,
S. L. Samsonovich, K. M. Tihonov

This article contains the results of mathematical simulation of a gas-hydraulic power supply with pyrotechnic power source which works in a parallel or sequential with an ejecting hydraulic cylinder. We have showed the comparative analysis of aircraft ejection launcher characteristics and have made the qualitative and quantitative assessments of working parameters.

Key words: gas-hydraulic power source, actuator, aircraft ejection launcher, mathematical simulation.

Alekseenkov Artem Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, atovus@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Beklemishev Philip Sergeevich, postgraduate, philipsmsk@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Lalabekov Valentin Ivanovich, doctor of technical sciences, researcher, Lalabekov.Valentin@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Pravidlo Mikhail Natanovich, doctor of technical sciences, professor, info@vypelmkb.com, Russia, Moscow, «Vypel» State Engineering Design Bureau JSC named after I.I. Toropov,

Samsonovich Semyon Lvovich, doctor of technical sciences, professor, Samsonovich40@gmail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Tihonov Konstantin Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, ktixo@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

ПРИМЕНЕНИЕ РЕТРАНСЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ В ЦЕЛЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ С ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМИ ШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ

С.Н. Агиевич, С.А. Луценко

Известные типы помеховых сигналов, к которым можно отнести стационарные (заградительная (широкополосная), сосредоточенная по полосе и узкополосная помехи) и нестационарные (импульсные) помехи не позволяют эффективно воздействовать на спутниковые системы радиосвязи (ССРС) в которых используются фазоманипулированные широкополосные сигналы (ФМШПС) с большим коэффициентом расширения спектра. Это требует создания новых подходов к вопросам противодействия ССРС с широкополосными сигналами. В статье предлагается использование ретранслированных помех, созданных с применением технологии цифровой радиочастотной памяти (ЦРЧП), в целях воздействия на ССРС с ФМШПС.

Ключевые слова: ФМШПС, DSSS, расширение спектра, ЦРЧП, ретранслированная помеха

Проблема обеспечения надежной спутниковой связи в условиях воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех, а также многостанционного доступа при работе в пакетных радиосетях наилучшим образом может быть решена при использовании в средствах радиосвязи сигналов с расширением спектра [1]. На сегодняшний день одним из базовых методов расширения спектра является метод непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью (ПСП), который также имеет название «прямое расширение спектра сигналов с помощью ПСП» (от англ. DSSS - Direct sequence spread spectrum). При данном методе расширение спектра достигается непосредственной модуляцией несущей частоты (двоичной ПСП), или за счет последовательной перестройки рабочей фазы передаваемого сигнала. В последнем случае сигналы называются фазоманипулированными широкополосными сигналами (ФМШПС). Принцип их формирования состоит в умножении сигнала несущей на ПСП с тактовой частотой, намного превышающей ширину полосы частот информационного сигнала. Эффект кратного расширения спектра позволяет добиваться требуемой надёжности передачи информации даже при малых соотношениях сигнал/шум, что обуславливает применение ФМШПС для передачи критичной для пользователя информации (например, команды управления и служебные данные) в сложной помеховой обстановке. На рис. 1 представлена упрощённая модель системы связи с ФМШПС.

На передающей части информационная последовательность $d(t)$ умножается на двоичную ПСП $p(t)$ и передатчик излучает полезный сигнал $m(t)$ в спутниковый канал связи. При передаче по спутниковым линиям

связи полезный сигнал $m(t)$ суммируется как с непреднамеренными $n(t)$, так и с преднамеренными помехами $j(t)$, после чего смешанный сигнал $r(t)$ поступает на вход приемника. На приемной части широкополосный сигнал $r(t)$ умножается на точную копию ПСП $p(t)$, используемой в передатчике. В результате дальнейшей демодуляции сигнала $z(t)$ решающее устройство выдает оценку информационной последовательности $\hat{d}(t)$.

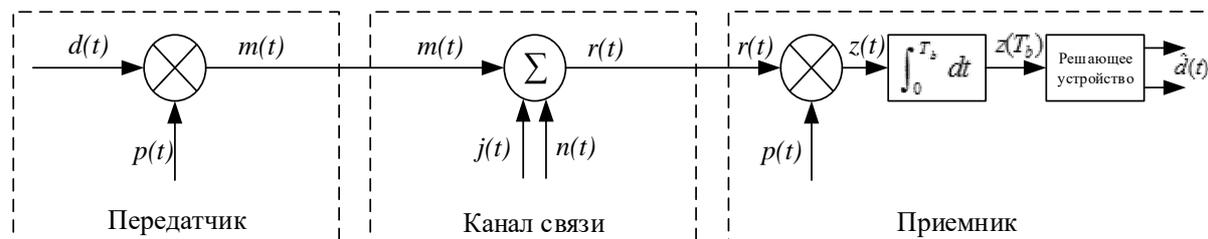


Рис. 1. Упрощённая модель системы связи с ФМШПС

В работах [2–5] описываются общие способы постановки помеховых сигналов спутниковым каналам связи, однако вопросы непосредственного выбора оптимальной помехи для подавления СРС с ФМШПС освещены недостаточно. Стоит отметить, что использование основных типов помех (заградительной, сосредоточенной по полосе, узкополосной, импульсной) не всегда эффективно при воздействии на ФМШПС с большим коэффициентом расширения спектра (от 20 дБ и выше). В данной работе предлагается использование ретранслированных помех, созданных с применением технологии цифровой радиочастотной памяти (ЦРЧП). Данная технология и устройства нашли широкое применение в системах радиоэлектронной борьбы (РЭБ) с радиолокационными станциями (РЛС), но в целях воздействия на системы радиосвязи ее использование достаточно ограничено. В системе с ЦРЧП нет необходимости формировать помеховый сигнал с нуля. Для этой цели используется принимаемый сигнал, который обрабатывается соответствующим образом. Обратный сигнал, передаваемый системой с ЦРЧП в сторону приемника радиосвязи воспринимается им не как посторонний мешающий сигнал, а как полезный сигнал, подлежащий обработке.

На рис. 2 представлена структурная схема генератора ретранслированных помех СРС с ФМШПС, основанного на технологии ЦРЧП.

Как видно из схемы, полезный сигнал поступает на вход приемной антенны генератора ретранслированных помех (ГРП), усиливается, фильтруется и повторно излучается через передающую антенну ГРП. Для ФМШПС форма ретранслированной помехи представляет собой задержанную копию полезного сигнала. Таким образом, на входе приемника ретранслированная помеха воспринимается как полезный сигнал, что может приводить к ошибкам на выходе решающего устройства. В СРС чаще все-

го оценка помехозащищенности производится по критерию средней вероятности ошибки (СВО) на бит информации. Однако в системах с ФМШПС наиболее критичным моментом помимо вышеуказанного является процедура синхронизации.

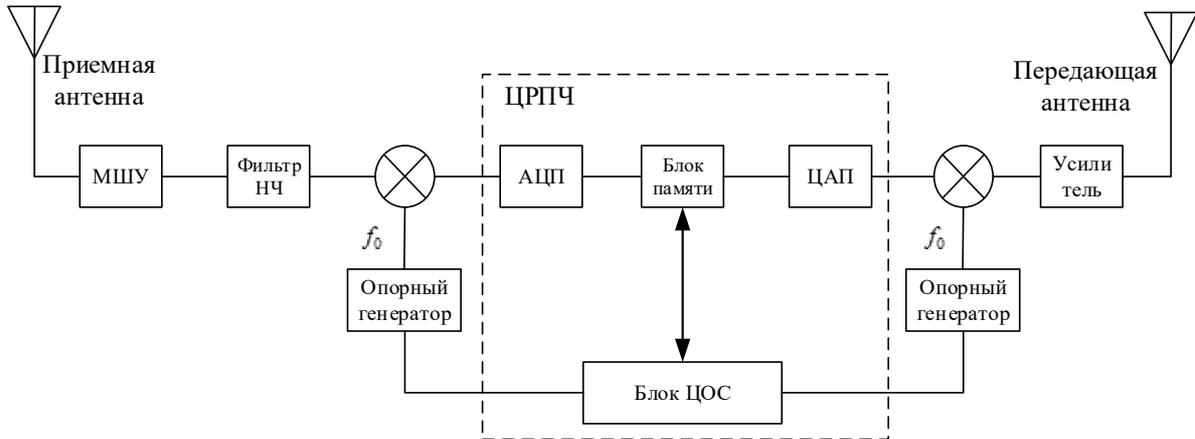


Рис. 2. Структурная схема генератора ретранслированных помех ССРС с ФМШПС, основанного на технологии ЦРПЧ

В соответствии с [1] синхронной ССРС называется такая система, в которой для приема дискретного сообщения с неизвестными синхропараметрами применяется оптимальный приемник в совокупности с системой синхронизации, осуществляющей в общем случае оценку неизвестных синхропараметров сигнала и подстройку приемника для достижения наилучшего соответствия между принимаемыми сигналами и алгоритмом работы приемника ССРС. При этом оценка момента начала кодовой последовательности должна определяться с точностью не меньшей, чем длительность двоичного кодового символа (символа ПСП), а центральная частота сигнала с точностью, при которой полезный сигнал после смесителя оказался бы в полосе пропускания фильтра коррелятора (согласованного фильтра).

В зависимости от того, каким образом формируется информация о синхропараметрах сигналов различают несколько методов, которые можно использовать для обеспечения синхронной работы передатчика и приемника СРС с общей псевдослучайной последовательностью. В общем виде структурная схема системы синхронизации для ССРС с ФМШПС имеет вид, представленный на рис. 3.

Предположим, что на вход приемного устройства поступает сумма переданного ССРС полезного сигнала $m(t)$ и шумовой компоненты $n(t)$. В этом случае сигнал имеет вид

$$r(t) = \sqrt{R}m(t - \delta) + n(t), \quad (1)$$

где $n(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ), R – средняя мощность принятого сигнала, δ – временная задержка. Вероятность обнаружения сигнала равна

$$P_d = 1 - P_m = Q(\sqrt{2\nu}, \sqrt{-2 \ln P_{fa}}), \quad (2)$$

где $Q(\cdot)$ – Q-функция Маркума; P_d – вероятность обнаружения; P_m – вероятность пропуска; P_{fa} – вероятность ложной тревоги.



Рис. 3. Структурная схема системы синхронизации для ССРС с ФМШПС

При воздействии ретранслированной помехи, сигнал на входе приемного устройства приобретает вид

$$r(t) = \underbrace{\sqrt{R}m(t - \delta) + n_1(t)}_{\text{Перехваченный сигнал}} - \underbrace{\sqrt{P_j}m(t - \delta') + n_2(t)}_{\text{Ретрансляционная помеха}}, \quad (3)$$

$$= \sqrt{R}m(t - \delta) - \sqrt{P_j}m(t - \delta') + n(t)$$

где P_j – средняя мощность ретранслированной помехи (при рассмотрении в данной работе полагаемой равной мощности принятого сигнала R); $\delta - \delta'$ – величина задержки между сигналом ретранслированной помехи и полезным сигналом на входе приемника, $n(t) = n_1(t) + n_2(t)$ – АБГШ.

Статистика решения на выходе интегратора равна

$$z = \frac{1}{2T_b^2} \left| \int_{T_b} r(t)m(t - \hat{\delta}) dt \right|^2 =$$

$$= \left| \sqrt{\frac{R}{2}} \cdot (R_{mm}(\delta - \hat{\delta}) - R_{mm}(\delta' - \hat{\delta})) + \frac{1}{\sqrt{2}T_b} \int_{T_b} n(t)m(t - \hat{\delta}) dt \right|^2, \quad (4)$$

где $R_{mm}(\tau)$ – автокорреляционная функция $m(t)$. Если используется M-последовательность с периодом N , то

$$R_{mm}(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{N+1}{N} \frac{|\tau|}{T_c}, & |\tau| \leq T_c \\ -\frac{1}{N}, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (5)$$

Из уравнения (4) следуют две гипотезы:

$$H_0 : z = \left| \frac{1}{\sqrt{2T_b}} \int_{T_b} n(t)m(t-\hat{\delta})d(t) \right|^2 \quad \text{фазы не совпадают} \quad (6)$$

$$H_1 : z = \left| \sqrt{\frac{R}{2}} \frac{\tau'}{T_c} + \frac{1}{\sqrt{2T_b}} \int_{T_b} n(t)m(t-\hat{\delta})d(t) \right|^2 \quad \text{фазы совпадают}$$

Предполагается, что $T_c \ll T$, γ означает порог принятия решения. Тогда вероятность ложного обнаружения равна

$$P_{fa} = \exp\left(-\frac{\gamma T_b}{2N_0}\right). \quad (7)$$

Обозначим $\tau' = \delta - \delta' < T_c$, тогда вероятность пропуска равна

$$P_m = \int_0^{\sqrt{\frac{\gamma T_b}{N_0}}} u \exp\left(-\frac{u^2 + 2v}{2}\right) I_0(\sqrt{2v}u) du, \quad (8)$$

$$v' = \left(\sqrt{\frac{R}{2}} \frac{\tau'}{T_c}\right)^2 T_b / (2N_0)$$

где v' – модифицированное соотношение сигнал/шум; $I_0()$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Если относительное время задержки τ' равно половине длительности кодового символа ПСП, входное соотношение сигнал/шум на входе энергетического детектора при воздействии ретранслированной помехи уменьшается на 9 дБ. Графики сравнения рабочих характеристик приемника при воздействии заградительной и ретранслированной помехи представлены на рис. 4.

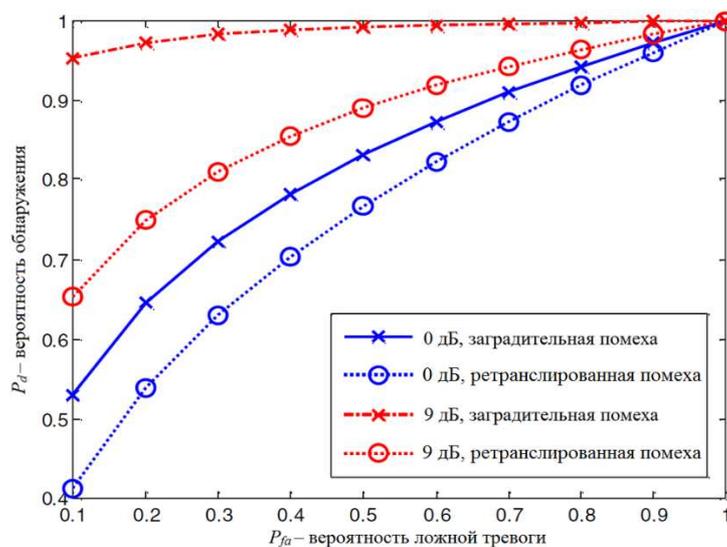


Рис. 4. Сравнение рабочих характеристик приемника при воздействии заградительной и ретранслированной помехи

Как следует из сравнения графиков, изображенных на рис. 4 воздействие ретранслированной помехи на процессы синхронизации в ССРС с ФМШПС более эффективно, чем применение заградительной помехи. Этот факт можно объяснить высокой степенью корреляции сигнала ретранслированной помехи с полезным ФМШПС.

Что касается СВО на бит информации, то значение данного показателя при воздействии ретранслированной помехи выше вследствие уменьшения соотношения сигнал/шум на входе приемного устройства ССРС. Из уравнения (8) при условии, что мощность ретранслированной помехи сравнима с мощностью сигнала на входе приемного устройства, входное соотношение сигнал/шум уменьшается на $\tau'^2 / 2T_c^2$. Таким образом, СВО равна

$$P_e = Q \left(\sqrt{Nv \left(\frac{\tau'}{T_c} \right)^2} \right). \quad (9)$$

Рис. 5 показывает зависимости СВО на бит P_e , как функции отношения сигнал/шум при заданном значении сигнал/помеха.

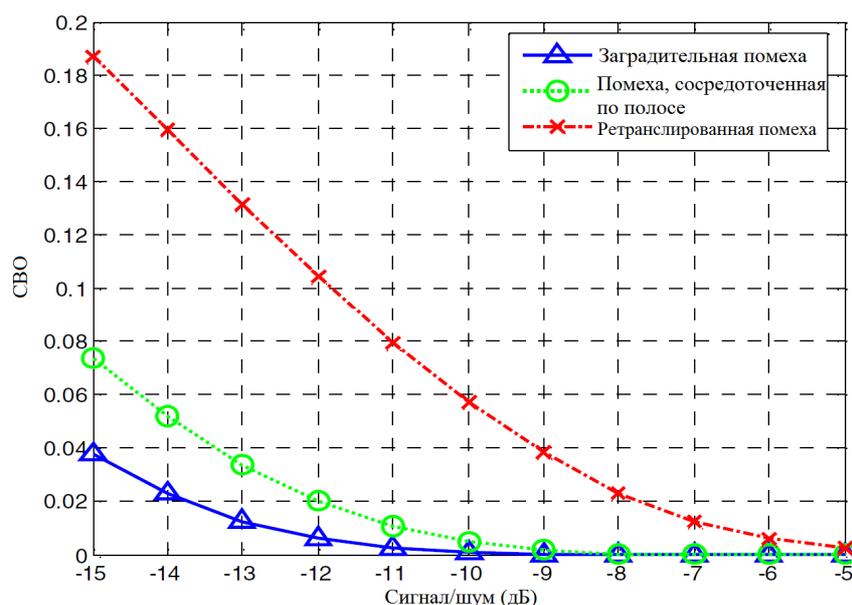


Рис. 5. СВО на бит при постановке заградительной, сосредоточенной по полосе и ретранслированной помехи

В данной статье представлен вариант формирования ретранслированных помех, созданных с применением технологии цифровой радиочастотной памяти (ЦРЧП), в целях воздействия на ССРС с ФМШПС. Рассмотренная ретранслированная помеха обладает свойством высокой корреляции с оригинальным ФМШПС, что позволяет эффективно воздействовать на процесс синхронизации и повышать СВО. Результаты моделирования в среде Матлаб подтверждают корректность использованных теорети-

ческих выражений. Таким образом, на низких уровнях сигнал/шум применение корреляционных ретранслированных помех имеет большую эффективность по сравнению с известными типами помех.

Список литературы

1. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью // В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, Н.П. Мухин, Г.С. Нахмансон; Под ред. В.И. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.

2. Луценко С.А. Методический аппарат деструктивного воздействия на спутниковые командно-программные радиолинии // Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды X Общероссийской научно-практической конференции. СПб.: Военмех, 2017. С. 233 – 241.

3. Агиевич С.Н., Гулидов А.А., Луценко С.А. и др. Способ радиоподавления каналов связи. Патент РФ № 2637799 по заявке № 2017106110 от 22.02.2017.

4. Иванов А.А., Козлов С.Ю., Кудрявцев А.М. и др. Способ обработки результатов радиомониторинга. Патент РФ № 2659486 по заявке № 2017128046 от 04.08.2017.

5. Гудков А.А., Клецков Д.А., Кузьмин В.В., Удальцов Н.П. Модель распознавания объектов радиомониторинга в иерархических системах управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 1. С. 283–291.

Агиевич Сергей Николаевич, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, agievich@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого,

Луценко Сергей Александрович, адъютант, sergei.lutsenko@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого

APPLICATION OF REPEATER JAMMING FOR EFFECTS ON SATELLITE RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS WITH DIRECT SEQUENCE SPREAD SPECTRUM

S.N. Agievich, S.A. Lutsenko

Known jamming types, including broadband noise, partial-band noise and so on do not effectively affect satellite radiocommunication systems (SRS) in which direct sequence spread spectrum (DSSS) are used with a large coefficient of spreading. This requires the creation of new approaches to the issues of countering the SRS with broadband signals. The article proposes the use of repeater jamming, created using digital radio frequency memory (DRFM) technology, in order to influence the SRS with DSSS.

Key words: DSSS, spread spectrum, DRFM, repeater jamming.

Agievich Sergei Nicolaevich, doctor of technical sciences, senior researcher, agievich@rambler.ru, Russia, St. Petersburg, Military academy of communication of S.M. Budyonny,

Lutsenko Sergey Aleksandrovich, postgraduate, sergei_lutsenko@inbox.ru, Russia, St. Petersburg, Military academy of communication of S.M. Budyonny

УДК 621.398

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ЧАСТОТНО – МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ

А.В. Аношкин, А.И. Азаров

В статье представлены результаты исследования потенциальной помехоустойчивости сигналов ЧМНФ с различными индексами модуляции. В результате исследования был получен алгоритм, осуществляющий расчет зависимостей минимальных евклидовых расстояний от индекса модуляции в двоичных радиоприемах при различных количествах символьных интервалов, участвующих в решении относительно значения первого символа последовательности. В качестве частотного импульса использованы прямоугольный импульс с полным откликом, частотный импульс класса «косинус квадрат».

Ключевые слова: частотно-модулированные сигналы с непрерывной фазой, индекс модуляции, евклидово расстояние, частотный импульс, фазовый импульс.

ЧМНФ сигналы являются наиболее привлекательными с точки зрения спектральной эффективности. Высокая спектральная эффективность ЧМНФ сигналов обусловлена постоянством их огибающей. Благодаря этому обеспечивается более высокая скорость убывания спектральной плотности мощности этих сигналов с увеличением расстройки частоты.

При этом множество различных символов ЧМНФ сигналов отличаются не только значениями частоты, но и значениями начальной фазы, вследствие чего соседние символы ЧМНФ сигналов обладают межсимвольной фазовой связью, т.к. начальная фаза любого символа зависит от значений нескольких предыдущих информационных символов.

Важным параметром ЧМНФ сигналов, определяющим их спектральные свойства и энергетическую эффективность, является индекс модуляции:

$$h = \Delta FT = 2f_D T, \quad (1)$$

где f_D – девиация частоты; T – длительность символа

Групповой видеосигнал $d(t)$, используемый для формирования ЧМНФ сигнала, может быть записан в виде:

$$d(t) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n g(t - nT) \quad \text{при } 0 \leq t \leq NT, \quad (2)$$

где I_n – значение n -го символа видеосигнала; $g(t)$ – частотный импульс (ЧИ), определяющий закон изменения частоты на длительности символа радиосигнала; N – количество символов группового видеосигнала; T – длительность символа.

ЧМНФ сигнал может быть записан следующим образом:

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega t + \varphi(t; I_n)) \quad \text{при } 0 \leq t \leq NT, \quad (3)$$

где E – энергия символа радиосигнала; ω – круговая частота несущего колебания; $\varphi(t; I_n)$ – приращение фазы несущего колебания в зависимости от поступающих на модулятор видеоимпульсов; I_n – значение n -го символа видеосигнала.

Приращение фазы несущего колебания:

$$\varphi(t; I_n) = \theta_n + 2\pi h q(t - nT) \quad \text{при } 0 \leq t \leq NT, \quad (4)$$

где θ_n – начальная фаза n -го символа радиосигнала; $q(t)$ – фазовый импульс (ФИ), определяющий закон приращения фазы на длительности символа радиосигнала;

Фазовый импульс связан с частотным импульсом соотношением:

$$q(t) = \int_0^t g(t) dt \quad \text{при } 0 \leq t \leq T, \quad (5)$$

и определяет форму спектральной плотности мощности радиосигнала и соответствующий уровень внеполосных излучений.

Приращение фазы несущего колебания может быть представлено графически в виде фазовой траектории [2] на фазовой решетке, количество и значения узлов которой в пределах от $\varphi=0$ до $\varphi=2\pi$ определяются индексом h модуляции [3]. При этом форма ребер фазовой решетки определяется фазовым импульсом $q(t)$, так если в качестве частотного импульса используется прямоугольный импульс, то ребра фазовой решетки являются кусочно-линейными, если частотный импульс представлен импульсом класса «косинус квадрат», то ребра имеют сглаженную форму.

Потенциальная помехоустойчивость ЧМНФ сигналов определяется минимальным евклидовым расстоянием [1] между двумя фазовыми траекториями, выходящими из одного и того же узла фазовой решетки и возвращающимися в него же в более позднее время.

Рассмотрим процесс нахождения евклидовых расстояний между фазовыми траекториями.

Пусть имеются две информационные последовательности символов одинаковой длины N , различающиеся в первом символе:

$$P_N^{(1)} = \{\alpha, I_2^{(1)}, I_3^{(2)}, \dots, I_N^{(1)}\}; P_N^{(2)} = \{\beta, I_2^{(2)}, I_3^{(2)}, \dots, I_N^{(2)}\}, \quad (6)$$

Соответствующие им ЧМНФ сигналы обозначим как $s_i(t)$ и $s_j(t)$. Евклидово расстояние между ними:

$$\begin{aligned} D_{ij}^2 &= \int_0^{NT} (s_i(t) - s_j(t))^2 dt = \\ &= \int_0^{NT} s_i^2(t) dt + \int_0^{NT} s_j^2(t) dt - 2 \int_0^{NT} s_i(t) s_j(t) dt, \end{aligned} \quad (7)$$

Воспользовавшись тем, что:

$$E = \int_0^T s_i^2(t) dt = \int_0^T s_j^2(t) dt, \quad (8)$$

Получим:

$$D_{ij}^2 = 2NE - 2 \int_0^{NT} s_i(t) s_j(t) dt, \quad (9)$$

Так как любой ЧМНФ сигнал в цифровой радиолинии может быть представлен в виде (3), формула (9) запишется в виде:

$$D_{ij}^2 = 2NE - 2 \int_0^{NT} \left(\sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega t + \varphi(t; I_i)) \right) \left(\sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega t + \varphi(t; I_j)) \right), \quad (10)$$

Используя известные тригонометрические преобразования, перейдем от произведения косинусов к их сумме, предварительно вынося амплитуды сигналов за знак интеграла как константу:

$$\begin{aligned} D_{ij}^2 &= 2NE - \frac{2E}{T} \int_0^{NT} (\cos(2\omega t + \varphi(t; I_i) + \varphi(t; I_j)) + \\ &\quad + \cos(\varphi(t; I_i) - \varphi(t; I_j))) dt, \end{aligned} \quad (11)$$

Так как интеграл от суммы может быть представлен в виде суммы интегралов, евклидово расстояние D_{ij}^2 перепишется в виде:

$$\begin{aligned} D_{ij}^2 &= 2NE - \left(\frac{2E}{T} \int_0^{NT} (\cos(2\omega t + \varphi(t; I_i) + \varphi(t; I_j))) dt + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2E}{T} \int_0^{NT} \cos(\varphi(t; I_i) - \varphi(t; I_j)) dt \right), \end{aligned} \quad (12)$$

Первый интеграл в (12) равен нулю при условии, что на длительности символа укладывается целое число периодов несущего колебания, т.к.

суммарный набег фазы относительно любого узла решетки для противоположных сигналов на длительности символа равен нулю (слагаемое в $\varphi(t:I_i)+\varphi(t:I_j)$ аргументе косинуса равно нулю при любых значениях N). Поэтому (12) переписывается в виде:

$$D_{ij}^2 = 2NE - 2 \int_0^{NT} \cos(\varphi(t:I_i) - \varphi(t:I_j))dt, \quad (13)$$

Данное выражение несложно упростить, представив $2NE$ в виде интеграла:

$$2NE = \frac{2E}{T} \int_0^{NT} 1dt, \quad (14)$$

Тогда:

$$D_{ij}^2 = \frac{2E}{T} \int_0^{NT} 1dt - \frac{2E}{T} \int_0^{NT} \cos(\varphi(t:I_i) - \varphi(t:I_j))dt, \quad (15)$$

Откуда:

$$D_{ij}^2 = \frac{2E}{T} \int_0^{NT} 1 - \cos(\varphi(t:I_i) - \varphi(t:I_j))dt, \quad (16)$$

Для того чтобы иметь возможность сравнивать сигналы с разными энергиями, нормируем полученное евклидово расстояние к энергии сигнала [4]:

$$d^2 = \frac{D_{ij}^2}{2E}, \quad (17)$$

Особый теоретический интерес представляет собой верхняя граница $d^2_{\text{с}}$ минимального нормированного евклидова расстояния между двумя фазовыми траекториями, имеющими минимальную протяженность до слияния, которая не может быть превышена при сколь угодно большом значении N .

Условие слияния фазовых траекторий на символьном интервале с номером n может быть представлено уравнением:

$$\int_{nT}^{(n+1)T} (\cos \varphi(t:I_{\alpha,n}^{(1)}) - \cos \varphi(t:I_{\beta,n}^{(2)}))dt = 0, \quad (18)$$

Алгоритм расчета зависимости минимальных нормированных евклидовых расстояний от индекса модуляции включает в себя следующие операции:

1. Построение фазовых решеток для ЧМНФ сигналов с индексами модуляции от 0 до 1 с выбранным значением шага.

2. Построение при заданном индексе модуляции фазовых траекторий, обнаружение слияний фазовых траекторий и выделение ближайшего из них.

3. Вычисление в точке ближайшего слияния фазовых траекторий верхней границы минимального нормированного евклидова расстояния $d^2_{\text{в}}$.

4. Пошаговое увеличение глубины анализируемой последовательности с вычислением на каждом шаге аддитивного приращения d^2 , причем в случае выполнения условия $d^2 \geq d^2_{\text{в}}$ в дальнейшем евклидово расстояние для каждой пары реализаций сигналов считается достигнутым верхней границы и больше не вычисляется.

5. Выявление на каждом шаге путем перебора значения минимального нормированного евклидова расстояния $d^2_{\text{min}}(h)$.

График зависимости $d^2_{\text{min}}(h)$ для прямоугольного ЧИ приведен на рис. 1.

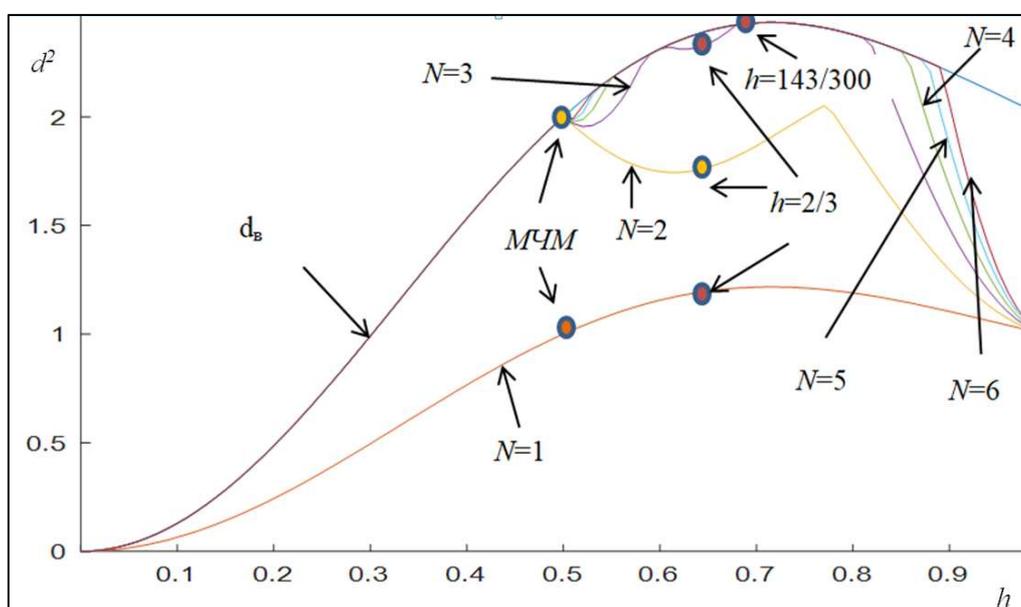


Рис. 1. График зависимости минимальных евклидовых расстояний от индекса модуляции для частотного импульса прямоугольной формы с полным откликом

Адекватность указанного алгоритма подтверждена тем, что для N , принимающего значения от 1 до 4, характер зависимостей полностью совпадает с результатами, опубликованными в [2], [4]. В настоящей работе получены результаты для $N=5$ и $N=6$. Характер полученных зависимостей свидетельствует о том, что с увеличением N значения d^2_{min} для h , изменяющегося от 0,5 до 1, все больше приближаются к верхней границе $d^2_{\text{в}}$.

Дальнейшее увеличение числа символов, участвующих в решении о значении первого символа последовательности N символов, нецелесообразно по следующим причинам. Во-первых, расчет d^2_{min} связан с интегрированием, что приводит к экспоненциальному росту сложности вычислений. Во-вторых, проанализировав рис. 1, нетрудно заметить, что при увеличении N от 4 до 6 значения d^2_{min} отличаются незначительно.

Из рис.1 видно, для сигналов ЧМНФ с индексом модуляции $h=1/2$, при $N=1$ $d_{min}^2=1$, но при увеличении N до 2 d_{min}^2 также увеличивается в 2 раза. Дальнейшее увеличение N для данного индекса модуляции h не приводит к увеличению значения d_{min}^2 т.к. оно уже достигло свою верхнюю границу. Сигналы с вышеуказанным индексом модуляции наиболее часто используются в современных цифровых системах связи. Данный вид сигналов получил название сигнал с минимальной частотной модуляцией (МЧМ).

Максимальное d_{min}^2 , а, следовательно, и максимальная помехоустойчивость достигается для индекса модуляции $h=143/200$ при $N=3$ и достигает значение 2,43. Данный результат совпадает с результатами исследований, приводимых в [4]. Однако, число узлов фазовой решетки, необходимой для построения приемника ЧМНФ сигналов для данного индекса модуляции, достигает 200. Поэтому аппаратная реализация такого приемника представляется затруднительной. С целью нахождения индексов модуляции h , обеспечивающих увеличение помехоустойчивости, могут быть исследованы и другие значения, представляющие практический интерес. Наиболее привлекательной представляется значение индекса модуляции $h=2/3$. В этом случае потенциальная помехоустойчивость ЧМНФ сигналов со значением индекса модуляции $h=2/3$ выше чем у ЧМНФ сигналов МЧМ при посимвольном приеме ($d_{min}^2=1,204$). При $N=2$ ЧМНФ сигналы со значением индекса модуляции $h=2/3$ заметно уступают по потенциальной помехоустойчивости ЧМНФ сигналам МЧМ. Однако уже при $N=3$ ЧМНФ сигналы со значением индекса модуляции $h=2/3$ обеспечивают значение $d_{min}^2=2,36$. При этом аппаратная реализация приемника ЧМНФ сигналов существенно упрощается. В плане потенциальной помехоустойчивости сигналы со значением индекса модуляции $h=2/3$ лишь немного проигрывают по потенциальной помехоустойчивости сигналам с $h=143/200$.

В представленных выше примерах ЧИ представляют собой прямоугольные видеоимпульсы. Однако, для формирования требуемой формы спектральной плотности мощности радиосигнала и соблюдения международных стандартов в области радиосвязи в части уменьшения уровня внеполосных излучений могут быть использованы видеоимпульсы с нелинейным законом изменения фазы.

График зависимости $d_{min}^2(h)$ для ЧИ «косинус квадрат» приведен на рис 2.

При сравнении вышеприведенных зависимостей можно заметить, что при значении индекса модуляции $h=0,5$ оба сигнала имеют одинаковые минимальные нормированные евклидовы расстояния. При увеличении значения индекса модуляции h наибольшие евклидовы расстояния имеет сигнал с прямоугольным ЧИ.

Из приведенных зависимостей видно, что для двоичных систем существует только одна «катастрофическая» точка значения индекса моду-

ляции $h=1$. Это объясняется тем, что для данного индекса модуляции h ближайшее слияние фазовых траекторий произойдет уже через один символичный интервал.

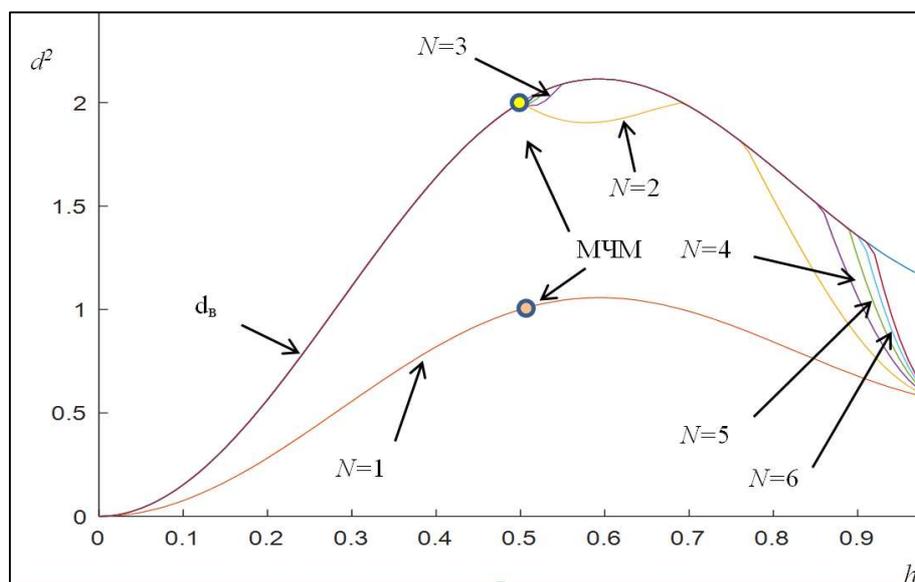


Рис. 2. График зависимости минимальных евклидовых расстояний от индекса модуляции для частотного импульса класса «косинус квадрат» с полным откликом

Выводы:

1. Приведенный выше алгоритм может быть полезен при разработке методики выбора индекса модуляции h ЧМНФ сигналов и длины N обрабатываемой последовательности для обеспечения заданной помехоустойчивости.

2. Применение ЧМНФ сигналов при выборе оптимальных значений индекса модуляции h и длины N обрабатываемой последовательности позволяет обеспечить более высокую помехоустойчивость, чем помехоустойчивость ФМн сигналов.

3. При увеличении плавности изменения фазового импульса, наблюдается два противоречивых результата. С одной стороны, происходит уменьшение уровня внеполосных излучений, а с другой стороны - уменьшение евклидовых расстояний и, следовательно, помехоустойчивости.

Список литературы

1. Резвцов Н.Б., А. В Аношкин А.В, Куприйчук Д.И. Системный анализ измерительных комплексов: учебник. М.: ВА РВСН, 1994. 312 с.
2. Пропис Дж. Цифровая связь: монография. М.: Радио и связь, 2000. 282 с.

3. Емельянов П.Б., Парамонов А.А. Дискретные сигналы с непрерывной фазой. М.: «Зарубежная радиотехника», 1990. №12.

4. T.Aulin, W.Sundberg Continuous phase modulation – Part I: Full response signaling. IEEE Transactions on communications, vol. com – 29.

Аношкин Александр Юрьевич, канд. тех. наук, профессор, преподаватель, sshkin@yandex.ru, Россия, Балашиха, Военная академия РВСН им. Петра Великого,

Азаров Андрей Игоревич, адъюнкт, azaroff1985@yandex.ru, Россия, Балашиха, Военная академия РВСН им. Петра Великого

POTENCIAL NOISE IMMUNITY OF FREQUENCY MODULATED SIGNALS WITH A CONTINUOUS PHASE

A.V. Anoshkin, A.I. Azarov

The article presents the results of a research of the potential noise immunity of signals with different modulation indices. As a result of the study, an algorithm was obtained that calculates the dependencies of the minimum Euclidean distances from the modulation index in binary radio lines at different numbers of symbol intervals participating in the decision with respect to the value of the first character of the sequence. As a frequency pulse, a rectangular pulse with a full response and a raised cosine were used.

Key words: continuous phase frequency shift keying signals, modulation index, Euclidean distance, frequency pulse, phase pulse.

Anoshkin Aleksandr Vladimirovich, candidate of technical sciences, professor, lecturer, sshkin@yandex.ru, Russia, Balashikha, Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great,

Azarov Andrey Igorevich, postgraduate, azaroff1985@mail.ru, Russia, Balashikha, Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great

РАЗЛИЧЕНИЕ И СИНХРОНИЗАЦИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ С ВНУТРИИМПУЛЬСНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ НА ФОНЕ БЕЛОГО ШУМА И УЗКОПОЛОСНОЙ АДДИТИВНОЙ ПОМЕХИ

В.И. Лютин, А.В. Ананьев, В.И. Гончаренко

В работе на основе теории совместной фильтрации дискретной случайной и непрерывной марковской последовательностей синтезирован алгоритм работы квази-когерентного приёмника дискретных радиосигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией на фоне белого шума и узкополосной аддитивной помехи.

Ключевые слова: сигнал с внутриимпульсной фазовой манипуляцией, помехоустойчивость линий радиосвязи, синтез алгоритма приёма сигналов, помехоустойчивость линий радиосвязи.

Применение сложных сигналов, к которым относятся псевдослучайные сигналы с внутриимпульсной фазовой манипуляцией с большой базой, позволяет повысить помехоустойчивость линий радиосвязи пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (ЛА) [1], в частности, бороться с узкополосными аддитивными помехами, попадающими в диапазон рабочих частот сложного сигнала. В настоящее время известны схемы приема сигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией, синтезированные на основе теории нелинейной фильтрации непрерывных марковских процессов [2-4]. При этом в названных работах полагается, что аналоговое информационное сообщение содержится в изменениях задержки, закон внутриимпульсной манипуляции не меняется, а характер изменений непрерывных неинформационных параметров сигнала таких, как фаза, частота, задержка, описывается стохастическими дифференциальными уравнениями.

Один из способов передачи дискретной информации при помощи сигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией заключается в управлении изменением кода М-последовательности в зависимости от передаваемого двоичного информационного символа (1 или 0) [6].

Применение модели непрерывных параметров в виде стохастических дифференциальных уравнений не позволяет осуществить корреляционную обработку радиосигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией при неизвестном коде М-последовательности, когда решение о дискретном параметре и мешающих непрерывных параметрах принимается по результатам приёма всего радиоимпульса.

В работах [13, 14] рассмотрены вопросы синтеза алгоритмов с вынесением решения о дискретном параметре до окончания радиоимпульса, что не позволяет в полной мере использовать положительные качества корреляционной обработки сложных сигналов.

Слежение за непрерывными параметрами при подобном подходе к синтезу требует вынесения решения о передаваемом информационном символе с минимальной задержкой после его смены, т. е. решение о передаваемом символе двоичной информации принимается по короткой начальной части очередного широкополосного радиоимпульсного сигнала. Это требует высокого отношения энергии короткой начальной части сигнала к спектральной плотности шума для минимизации вероятностей ошибочных решений о передаваемом символе, что не позволяет использовать главное свойство сложного сигнала, определяющее помехоустойчивость и помехозащищённость, – его сворачиваемость, реализуемое только при корреляционной обработке сложного сигнала.

Разрешить противоречие между необходимостью проводить корреляционную обработку сложных сигналов для вынесения решения о передаваемом символе дискретной информации с одной стороны, и применением непрерывных систем слежения за неинформационными параметрами с другой стороны, в рамках непрерывной модели изменений неинформационных параметров не представляется возможным. Отказаться от модели в виде стохастических дифференциальных уравнений и применить в качестве модели неинформационных параметров случайную марковскую последовательность позволяет учёт реальных условий кратковременной стабильности непрерывных параметров сигнала. Применение такой модели позволит без затруднений комплексировать задачу различения сложных сигналов и задачу слежения за медленно меняющимися неинформационными параметрами.

Принципы построения систем совместного различения и синхронизации сложных сигналов на основе алгоритмов нелинейной фильтрации непрерывных и дискретных марковских последовательностей в условиях кратковременной стабильности непрерывных параметров сложного сигнала сформулированы в [5], где показано, что та часть алгоритма, которая отвечает за оценку непрерывных параметров, именуемых синхропараметрами, трактуется как блок синхронизации. В работах [17-20] решена задача синтеза алгоритма работы приёмника сигналов двоичной дискретной информации, передаваемой при помощи сигналов с внутриимпульсной нелинейной модуляцией, приём которых осуществляется на фоне белого шума и узкополосной аддитивной помехи. В то же время представляет интерес решения аналогичной задачи для фазокодомодулированных (ФКМ) сигналов.

Начальным этапом рассмотрения данного вопроса является синтез схемы оптимального приема ФКМ [7]. К настоящему времени отсутствуют решения по компенсации узкополосной помехи и получения статистических оценок, представляющих собой вероятности ошибки различения сигналов от отношения амплитуд сигнала и помехи.

Целью настоящей работы является синтез алгоритма работы приёмника сигналов двоичной дискретной информации, передаваемой при помощи сигналов с внутриимпульсной фазо-кодовой манипуляцией, в которых код М-последовательности определяется передаваемым двоичным символом, в условиях действия узкополосной аддитивной помехи.

Каждому символу двоичной дискретной информации ставятся в соответствие различные, но имеющие одинаковую длину, коды М-последовательности внутри импульса ФКМ-сигнала. При приёме такого сигнала неизбежно возникает проблема предварительного оценивания мешающих параметров, знание которых необходимо при решении задачи различения сигналов. Решение этой проблемы состоит в построении системы синхронизации приёмника, работающей по информационному сигналу. При этом качество работы системы синхронизации определяет качество работы приёмника в целом.

Математическое выражение для k -го импульса ФКМ-сигнала при противоположных сигналах с одинаковыми кодами записывается в виде [15]

$$s_k(\theta_k, \tau_k, \varphi_k) = A \cos\left(\omega_0 t + \theta_k \sum_{m=1}^L a_m \text{rect}[t - mT_0 - \tau_k] \Delta\varphi + \varphi_k\right), \quad (1)$$

где θ_k – дискретный информационный параметр, принимающий случайным образом значения +1 или –1 при противоположных ФКМ-сигналах; τ_k – случайное отклонение длительности импульса ФКМ-сигнала; φ_k – случайная фаза несущей частоты; A – амплитуда сигнала, считающаяся известной и постоянной; ω_0 – несущая частота; T_0 – номинальное значение длительности тактового интервала ФКМ-сигнала; $\Delta\varphi = \pi/2$ – девиация фазы; $\text{rect}[t - mT_0 - \tau_k]$ – элементарный прямоугольный импульс длительностью T_0 , начинающийся в момент времени $mT_0 + \tau_k$; $a_k = \pm 1$ – значения элементов кода М-последовательности; L – число элементов кода (период М-последовательности); $T_C = LT_0$ – длительность одного импульса ФКМ-сигнала.

Случайные параметры τ_k, φ_k , определяют положение сигнала во временной и частотной областях и называются синхропараметрами.

Кратковременная стабильность синхропараметров характеризуется весьма малым значением относительной нестабильности генераторов несущей и тактовой частот за время действия радиоимпульса по сравнению с долговременной нестабильностью этих частот. Причиной тому является медленность отклонений частоты: за большее время происходит больший уход частоты, за меньшее время – меньший, что приводит к сильной корреляции значений частоты, наблюдаемых через короткие промежутки времени.

Узкополосная аддитивная помеха занимает полосу частот $\Delta\omega_{\Pi}$, гораздо меньшую, чем ширина спектра ФКМ-сигнала, поэтому помеха является квазигармоническим колебанием со случайной фазой ψ_k , постоянной в течение времени действия одного импульса ФКМ-сигнала

$$u_k(\psi_k, t) = U_{\Pi} \cdot \cos(\omega_{\Pi}t + \psi_k), \quad \omega_{\Pi} \in \left(\omega_0 \pm \frac{\Delta\omega}{2} \right),$$

где U_{Π} – амплитуда помехи, считающаяся известной и постоянной; ω_{Π} – среднее значение частоты помехи; ψ_k – случайная фаза.

Кратковременная стабильность синхропараметров и случайных параметров аддитивной помехи характеризуется весьма малым значением относительной нестабильности частоты генераторов, формирующих сигнал и помеху, за время действия радиоимпульса по сравнению с долговременной нестабильностью частоты. Причиной тому является медленность отклонений частоты: за большее время происходит больший уход частоты, за меньшее время – меньший, что приводит к сильной корреляции значений частоты, наблюдаемых через короткие промежутки времени [16].

Пусть изменения синхропараметров и случайных параметров аддитивной помехи происходят настолько медленно, что допустимо считать их постоянными в течение каждого импульса ФКМ-сигнала и изменяющимися от импульса к импульсу на очень малую величину, т.е. $|\varphi_k - \varphi_{k-1}| \ll \pi$, $|\tau_k - \tau_{k-1}| \ll T_0$, $|\psi_k - \psi_{k-1}| \ll \pi$. При этом изменения синхропараметров допустимо описывать гауссовскими марковскими последовательностями.

В соответствии с этим предположением характер изменения синхропараметров и случайных параметров аддитивной помехи допустимо описывать гауссовскими марковскими последовательностями. В случае независимых генераторов несущей и тактовой частот априорные рекуррентные уравнения для синхропараметров и случайного параметра аддитивной помехи имеют вид [8, 12]

$$\begin{aligned} \varphi_k &= \varphi_{k-1} + \sigma_{\varphi} \sqrt{1 - R_{\varphi}^2} \cdot \xi_k, & \tau_k &= \tau_{k-1} + \sigma_{\tau} \sqrt{1 - R_{\tau}^2} \cdot \zeta_k, \\ \psi_k &= \psi_{k-1} + \sigma_{\psi} \sqrt{1 - R_{\psi}^2} \cdot \eta_k, \end{aligned}$$

где σ_{φ} , σ_{τ} , σ_{ψ} – величины априорных среднеквадратических отклонений синхропараметров и фазы помехи, обусловленные долговременными нестабильностями соответствующих генераторов; R_{φ} , R_{τ} , R_{ψ} – коэффициенты корреляции между значениями синхропараметров и фазы помехи в соседних импульсах сигнала; ξ_k , ζ_k , η_k – последовательности независимых нормальных случайных величин с нулевыми средними и единичными дисперсиями.

Дискретный параметр θ_k принимает по случайному закону одно из двух значений $+1$ или -1 . В соответствии с этим предположением характер изменения дискретного параметра допустимо описывать независимой случайной последовательностью. Таким образом, задача построения квазикогерентного приёмника ФКМ-сигналов сводится к задаче совместной фильтрации гауссовской марковской и дискретной случайной последовательностей.

Пусть сигнал наблюдается в аддитивной смеси с белым гауссовским шумом $n(t)$ с характеристиками $\overline{n(t)} = 0$, $\overline{n(t_1) \cdot n(t_2)} = N\delta(t_2 - t_1)$, где N – односторонняя спектральная плотность мощности шума, $\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0, \\ 0, & x \neq 0. \end{cases}$ – дельта функция Дирака, и аддитивной помехой $u_{\Pi}(t)$

$$y_k(t) = s_k(\theta_k, \tau_k, \varphi_k, t) + u_k(\psi_k, t) + n(t). \quad (2)$$

По результатам наблюдения $y_k(t)$ необходимо решить, какое значение имел дискретный информационный параметр θ_k , если изменения синхропараметров τ_k, φ_k описываются гауссовскими марковскими последовательностями.

Обозначим

$$x_k(\theta_k, \bar{\lambda}_k) = s_k(\theta_k, \tau_k, \varphi_k, t) + u_k(\psi_k, t),$$

где $\bar{\lambda}_k = (\tau_k, \varphi_k \cup \psi_k)$ – векторный марковский параметр, являющийся объединением синхропараметров сигнала и параметра помехи.

Для векторного марковского параметра $\bar{\lambda}_k = \{\lambda_{1k}, \dots, \lambda_{rk}\}$ и независимых дискретных параметров $\theta_k^{(j)}$, $j = 1, \dots, M$ асимптотический квазилинейный алгоритм в стационарном режиме при высоком отношении энергии сигнала к спектральной плотности шума, при соблюдении условий априорной независимости компонентов вектора $\bar{\lambda}_k$

$$M \{ \lambda_{\alpha k} \cdot \lambda_{\beta k} \} = 0, \quad \alpha \neq \beta,$$

и сигнальной ортогональности

$$\int_{t-(k-1)T_C}^{t-kT_C} x_k(\theta_k^{(j)}, \bar{\lambda}_k) \cdot x_k(\theta_k^{(i)}, \bar{\lambda}_k) dt = 0, \quad i \neq j,$$

имеет вид [5, 9]

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_k = \arg \max_j \{ \Pi(\theta_k^{(j)}, \bar{\lambda}_k^{\vartheta}) \} \quad j = 1, \dots, M, \\ \hat{\lambda}_{\alpha k} = \lambda_{\alpha k}^{\vartheta} + \bar{d}_{\alpha k} \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda_{\alpha k}} \Pi(\theta_k^{(j)}, \bar{\lambda}_k^{\vartheta}), \quad \alpha = 1 \dots r, \\ \bar{d}_{\alpha k} = \frac{D_{\alpha}}{1 - D_{\alpha} \cdot \Pi''_{\alpha\alpha}}, \end{array} \right.$$

где $\Pi(\theta_k^{(j)}, \bar{\lambda}_k^\varepsilon) = -\frac{1}{2N} \int_{t-(k-1)T_C}^{t-kT_C} [y_k(t) - x_k(\theta_k^{(j)}, \bar{\lambda}_k^\varepsilon)]^2 dt$ – логарифм функционала отношения правдоподобия (ЛФОП); $\lambda_{\alpha k}^\varepsilon = R_{\lambda\alpha} \cdot \hat{\lambda}_{\alpha k-1}$ – экстраполированная оценка компонентов векторного параметра;

$\bar{\Pi}_{\alpha\alpha}'' = \frac{\partial^2}{\partial \lambda_{\alpha k}^2} \bar{\Pi}(\theta_k^{(j)}, \bar{\lambda}_k^\varepsilon)$ – вторые производные от сигнальной части ЛФОП;

$D_\alpha = d_{\alpha 0} + R_{\lambda\alpha} \cdot \bar{d}_{\alpha k-1}$ – дисперсия экстраполированной оценки компонента векторного параметра; $d_{\alpha 0} = (1 - R_{\lambda\alpha}^2) \cdot \sigma_\alpha^2$ – дисперсия неустранимых отклонений параметра в течение приёма k -го сигнала (дисперсия кратковременной нестабильности параметра).

Первое уравнение – алгоритм принятия решений о дискретном параметре, второе уравнение – алгоритм фильтрации непрерывных параметров, трактуемый как алгоритм синхронизации, третье – стационарное значение апостериорной дисперсии непрерывного параметра.

В условиях действия узкополосной помехи ЛФОП записывается в виде

$$\Pi(\theta_k^{(j)}, \tau_k^\varepsilon, \varphi_k^\varepsilon, \psi_k^\varepsilon) = -\frac{1}{2N} \int_{t-(k-1)T_0}^{t-kT_0} y_k(t) \cdot \left\{ [s_k(\theta_k^{(j)}, \tau_k^\varepsilon, \varphi_k^\varepsilon, t) + u_k(\psi_k^\varepsilon, t)] - [s_k(\theta_k^{(j)}, \tau_k^\varepsilon, \varphi_k^\varepsilon, t) + u_k(\psi_k^\varepsilon, t)]^2 \right\} dt.$$

При высоком отношении энергии импульса ФКМ-сигнала к спектральной плотности шума и высоком качестве различения, когда апостериорная вероятность одного из дискретных параметров близка к единице, а другого – пренебрежимо мала, а также при использовании в качестве опорных значений синхропараметров экстраполированных на один шаг оценок, асимптотический алгоритм совместного различения и синхронизации ФКМ-сигналов в стационарном режиме записывается в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_k(\tau_k^\varepsilon, \varphi_k^\varepsilon, \psi_k^\varepsilon | \theta_k = 1) \underset{\gamma_k = -1}{\overset{\gamma_k = 1}{\geq}} \Pi_k(\tau_k^\varepsilon, \varphi_k^\varepsilon, \psi_k^\varepsilon | \theta_k = -1), \\ \hat{\tau}_k = \tau_k^\varepsilon + \bar{d}_\tau \cdot \Pi'_\tau(\tau_k^\varepsilon, \varphi_k^\varepsilon, \psi_k^\varepsilon | \theta_k = \gamma_k), \\ \hat{\varphi}_k = \varphi_k^\varepsilon + \bar{d}_\varphi \cdot \Pi'_\varphi(\tau_k^\varepsilon, \varphi_k^\varepsilon, \psi_k^\varepsilon | \theta_k = \gamma_k), \\ \hat{\psi}_k = \psi_k^\varepsilon + \bar{d}_\psi \cdot \Pi'_\psi(\tau_k^\varepsilon, \varphi_k^\varepsilon, \psi_k^\varepsilon | \theta_k = \gamma_k), \end{array} \right. \quad (3)$$

где $\gamma_k = \begin{cases} 1, & \text{при } \theta_k = 1 \\ -1, & \text{при } \theta_k = -1 \end{cases}$ – решения о значении дискретного информационного параметра на k -ом шаге, используемые при вычислении оценок синхропараметров и параметра помехи; $\hat{\tau}_k, \hat{\phi}_k, \hat{\psi}_k$ – оценки синхропараметров и параметра помехи в k -ом импульсе сигнала; $\tau_k^\vartheta = R_\tau \cdot \hat{\tau}_{k-1}$, $\phi_k^\vartheta = R_\phi \cdot \hat{\phi}_{k-1}$, $\psi_k^\vartheta = R_\psi \cdot \hat{\psi}_{k-1}$ – экстраполированные оценки синхропараметров и параметра помехи, используемые при различении дискретных параметров в k -ом импульсе сигнала; $\Pi_k(\tau_k^\vartheta, \phi_k^\vartheta, \psi_k^\vartheta | \theta_k = \gamma_k)$ – логарифм функционала отношения правдоподобия экстраполированных оценок синхропараметров и параметра помехи при фиксированных значениях дискретного параметра; $\bar{d}_\tau, \bar{d}_\phi, \bar{d}_\psi$ – стационарные значения апостериорных дисперсий оценок синхропараметров.

Апостериорные дисперсии оценок синхропараметров определяются при $k \rightarrow \infty$ из рекуррентного уравнения для апостериорной дисперсии синхропараметра [9, 10]

$$d_{\lambda k}^{-1} = \left[(1 - R_\lambda^2) \cdot \sigma_\lambda^2 \right]^{-1} - \bar{\Pi}_{\lambda\lambda}''(\tau_k^\vartheta, \phi_k^\vartheta, \psi_k^\vartheta | \theta_k = \gamma_k),$$

где λ – один из непрерывных параметров τ, ϕ, ψ ; σ_λ^2 – априорная дисперсия соответствующего непрерывного параметра; $\bar{\Pi}_{\lambda\lambda}''(\tau_k^\vartheta, \phi_k^\vartheta, \psi_k^\vartheta | \theta_k = \gamma_k) = q_k R_{\lambda\lambda}''(\tau_k^\vartheta, \phi_k^\vartheta, \psi_k^\vartheta | \theta_k = \gamma_k)$ – вторая производная по соответствующему синхропараметру от сигнальной части ЛФОП [4], равная произведению отношения энергии одного импульса ФКМ-сигнала $E_k = A^2 \cdot T_0$ к спектральной плотности шума $q_k = \frac{E_k}{N}$ на вторую производную от нормированной автокорреляционной функции ФКМ-сигнала.

Первое уравнение в выражении (3) определяет правило принятия решений о дискретном информационном символе, а остальные – определяют алгоритм работы следящих систем или систем синхронизации. Решения о дискретном параметре принимаются при экстраполированных на один шаг неинформационных параметрах, вычисленных по результатам наблюдений на предыдущих шагах. Это возможно благодаря учёту кратковременной стабильности синхропараметров и параметра помехи. Оценочные значения синхропараметров и параметра помехи вычисляются по окончании наблюдения очередного импульса сложного сигнала. При этом используется результат решения о дискретном параметре, что называется обратной связью по решению.

Поскольку синхропараметры сигнала и параметр помехи неэнергетические, то ЛОФП записывается в виде

$$\Pi_k(\tau_k^\vartheta, \varphi_k^\vartheta, \psi_k^\vartheta | \theta_k = \gamma) =$$

$$= \frac{A}{N} \int_{(k-1)LT_0 + \tau_k^\vartheta}^{kLT_0 + \tau_k^\vartheta} v_k(t) \cos \left(\omega_0 t + \theta_k \sum_{m=1}^L a_m \operatorname{rect} \left[t - mT_0 - \tau_k^\vartheta \right] \Delta\varphi + \varphi_k^\vartheta \right) dt, \quad \gamma = +1, -1$$

где $v_k(t) = y_k(t) - s_k(\gamma, \tau_k^\vartheta, \varphi_k^\vartheta, t)$, $\gamma = 1, 0$

Производная от ЛФОП по фазе φ_k^ϑ равна

$$\Pi_k(\tau_k^\vartheta, \varphi_k^\vartheta, \psi_k^\vartheta | \theta_k = \gamma) =$$

$$= \frac{A}{N} \int_{(k-1)LT_0 + \tau_k^\vartheta}^{kLT_0 + \tau_k^\vartheta} v_k(t) \sin \left(\omega_0 t + \theta_k \sum_{m=1}^L a_m \operatorname{rect} \left[t - mT_0 - \tau_k^\vartheta \right] \Delta\varphi + \varphi_k^\vartheta \right) dt, \quad \gamma = +1, -1.$$

Вычисление производных от ЛФОП по параметрам $\tau_k^\vartheta, \beta_k^\vartheta$ в явном виде затруднительно, поэтому представим их в конечных разностях, что позволит указать способ практической реализации приёмника.

Производная от ЛФОП в конечных разностях по задержке равна

$$\Pi'_\tau(\tau_k^\vartheta, \varphi_k^\vartheta, \psi_k^\vartheta | \theta_k = \gamma) =$$

$$= \frac{A}{N} \frac{1}{2\Delta\tau} \left[\int_{(k-1)LT_0 + \tau_k^\vartheta + \Delta\tau}^{kLT_0 + \tau_k^\vartheta + \Delta\tau} v_k(t) \cos \left(\omega_0 t + \theta_k \sum_{m=1}^L a_m \operatorname{rect} \left[t - mT_0 - \tau_k^\vartheta + \Delta\tau \right] \Delta\varphi + \varphi_k^\vartheta \right) dt - \right.$$

$$\left. - \int_{(k-1)LT_0 + \tau_k^\vartheta - \Delta\tau}^{kLT_0 + \tau_k^\vartheta - \Delta\tau} v_k(t) \cos \left(\omega_0 t + \theta_k \sum_{m=1}^L a_m \operatorname{rect} \left[t - mT_0 - \tau_k^\vartheta - \Delta\tau \right] \Delta\varphi + \varphi_k^\vartheta \right) dt \right], \quad \gamma = +1, -1.$$

Производная от ЛФОП по фазе помехи ψ_k^ϑ равна

$$\Pi'_\psi(\tau_k^\vartheta, \varphi_k^\vartheta, \psi_k^\vartheta | \theta_k = \gamma) = \frac{1}{N} \int_{(k-1)LT_0 + \tau_k^\vartheta}^{kLT_0 + \tau_k^\vartheta} \left[y_k(t) - U_{\Pi k} \sin(\omega_{\Pi} t + \psi_k^\vartheta) \times \right.$$

$$\left. \times A \cos \left(\omega_0 t + \theta_k \sum_{m=1}^L a_m \operatorname{rect} \left[t - mT_0 - \tau_k^\vartheta \right] \Delta\varphi + \varphi_k^\vartheta \right) dt \right], \quad \gamma = +1, -1$$

Устройство, вычисляющее производную от ЛФОП по параметру помехи, называется *дискриминатором фазы помехи* (ДП).

На рис. 1 приведена структурная схема квазикогерентного приёмника противоположных псевдослучайных сигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией и с системой компенсации гармонической помехи со случайной фазой.

Наблюдение $y_k(t)$, представляющее собой аддитивную смесь сигнала, узкополосной помехи и шума, поступает на сумматоры $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$, в которых из него вычитаются копия помехи $\hat{u}_k(t)$, копии сигналов

$\bar{s}_k(\theta_k = +1)$ и $\bar{s}_k(\theta_k = -1)$ для информационных символов $+1$ и -1 соответственно.

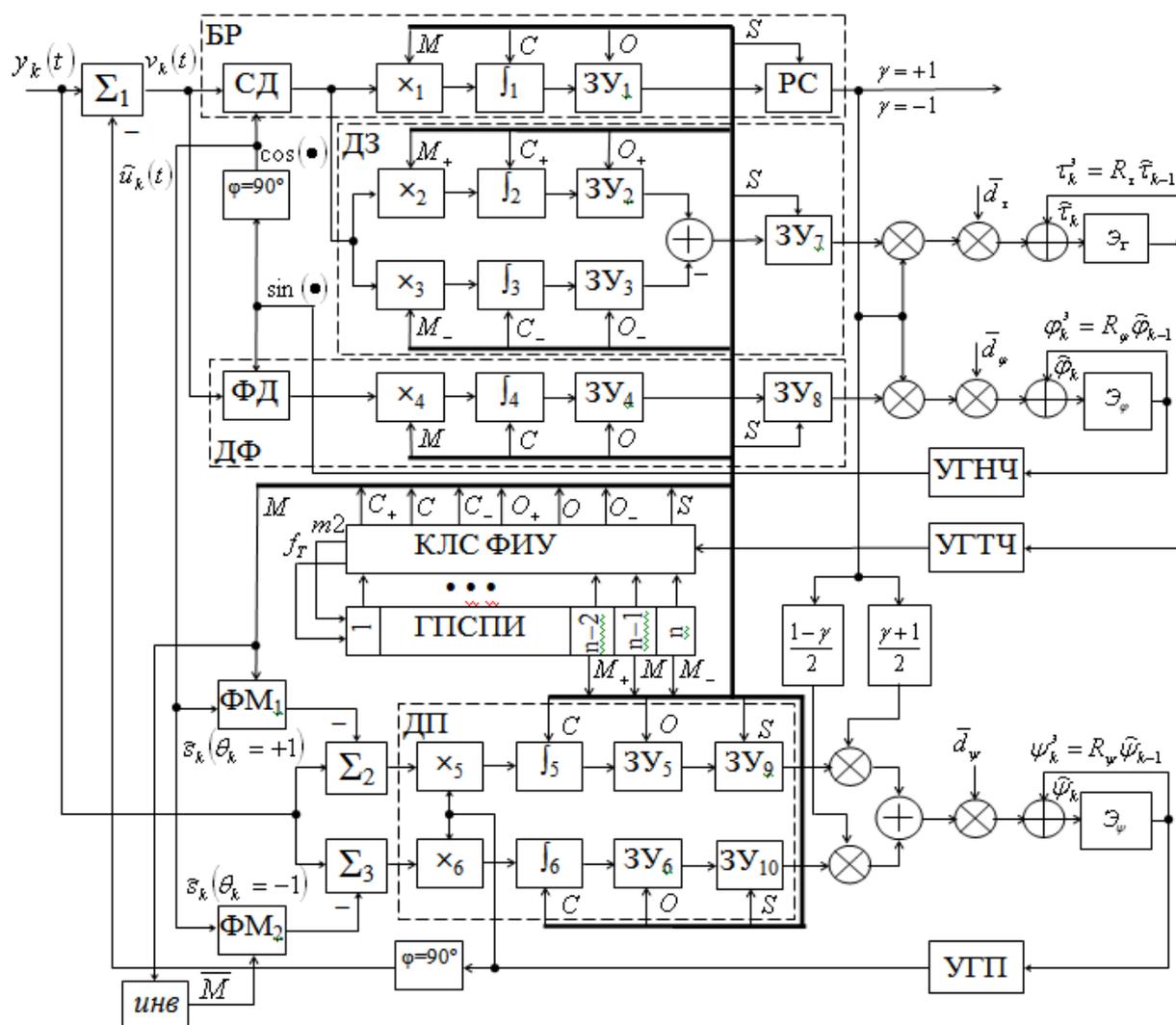


Рис. 1. Структурная схема приёмника

С выхода сумматора Σ_1 результат вычитания $v_k(t)$ поступает в приёмник фазоманипулированных псевдослучайных сигналов. Приёмник содержит два умножителя для синхронного (СД) и фазового (ФД) детектирования: синхронный детектор работает в составе блока различения сигналов (БР) и дискриминатора задержки (ДЗ); квадратурный детектор работает в составе дискриминатора фазы (ДФ); управляемые генераторы несущей частоты (УГНЧ), тактовой частоты (УГТЧ), генератор псевдослучайной последовательности импульсов (ГПСПИ) и комбинационную логическую схему формирования импульсов управления (КЛС ФИУ), экстраполяторы сигналов управления генераторами несущей (\mathcal{E}_φ) и тактовой (\mathcal{E}_τ) частот, которые являются элементами рекурсивных фильтров первого порядка.

Узлы приёмника БР, ДЗ, ДФ содержат корреляторы, каждый из которых состоит из умножителя результатов синхронного и квадратурного детектирования ($\times_1, \times_2, \times_3, \times_4$) на M -последовательности: опорную (M), опережающую (M_+) и отстающую (M_-) на один тактовый интервал от трёх смежных ячеек памяти с номерами $n-2$, $n-1$, n n -ячеечного регистра сдвига ГПСПИ, интеграторы ($\int_1, \int_2, \int_3, \int_4$), сбрасываемые в начале действия M -последовательности соответствующего умножителя, запоминающие устройства (ZU_1, ZU_2, ZU_3, ZU_4) для записи и хранения в течение периода M -последовательности результатов интегрирования, причём отсчёт и запоминание результатов интегрирования производится управляющими импульсами (O, O_+, O_-) от КЛС ФИУ в момент окончания периода M -последовательности, а сброс интеграторов производится управляющими импульсами (C, C_+, C_-) от КЛС ФИУ в момент начала следующего периода M -последовательности. Длительность τ_0 управляющих импульсов гораздо меньше длительности T_0 тактовых импульсов M -последовательности $\tau_0 \ll T_0$.

В состав устройства компенсации узкополосной помехи входят сумматоры $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$, в которых из наблюдения $y_k(t)$ вычитаются копия помехи $\hat{u}_k(t)$, копии сигналов $\hat{s}_k(\theta_k = +1)$ и $\hat{s}_k(\theta_k = -1)$ для информационных символов $+1$ и -1 соответственно. Применение двух копий сигналов обусловлено тем, что наперёд неизвестно, какой из сигналов передаётся, поэтому построены два канала определения сигналов ошибок. Выбор сигнала ошибки осуществляется по окончании очередного периода M -последовательности в зависимости от принятого в решающей схеме (РС) решения $\gamma = +1$ или $\gamma = -1$ и управляемый генератор колебаний с частотой помехи (УГП) и частоты помехи (\mathcal{E}_ψ).

В запоминающих устройствах ZU_7, ZU_8 и в ZU_9, ZU_{10} запоминаются на время обработки очередного (следующего) сигнала управляющие напряжения генераторами УГНЧ, УГТЧ и УГП в моменты времени, задаваемые отсчётными импульсами S , которые идут с минимальной технологической задержкой или даже совпадают с импульсами O_- . Технологическая задержка обусловлена временными сдвигами M -последовательностей вперёд (M_+) со сдвигом $\Delta\tau = -T_0$ и назад (M_-) со сдвигом $\Delta\tau = T_0$ на один тактовый интервал M -последовательности, так как производная от ЛФОП вычисляется как конечная разность.

Циклограмма M -последовательностей и управляющих импульсов приведена на рис. 2. Начало периода M -последовательности отмечено точкой. Для компактности рисунка период M -последовательности принят

равным $L = 7$. На циклограмме приведено 10 временных диаграмм: три – M -последовательности, семь – последовательности управляющих импульсов.

Отсчётными импульсами S управляется решающая схема РС, на выходе которой устанавливается решение о принятом сигнале $\gamma = +1$ при положительном знаке результата интегрирования в интеграторах \int_1 , запомненном в ЗУ₁, или $\gamma = -1$ – при отрицательном. Этими же импульсами S выполняется отсчёт результатов интегрирования сигналов управления с выходов корреляторов в ЗУ₇, ЗУ₈, ЗУ₉, ЗУ₁₀. Решение «+1» или «-1» подаётся на умножители сигналов ошибки ДЗ и ДФ, запомненных в ЗУ₇, ЗУ₈, и на блоки преобразования уровней $(1-\gamma)/2$ и $(\gamma+1)/2$, выдающих числа «1» или «0», подающиеся на умножители сигналов управления с выходов корреляторов системы компенсации помехи.

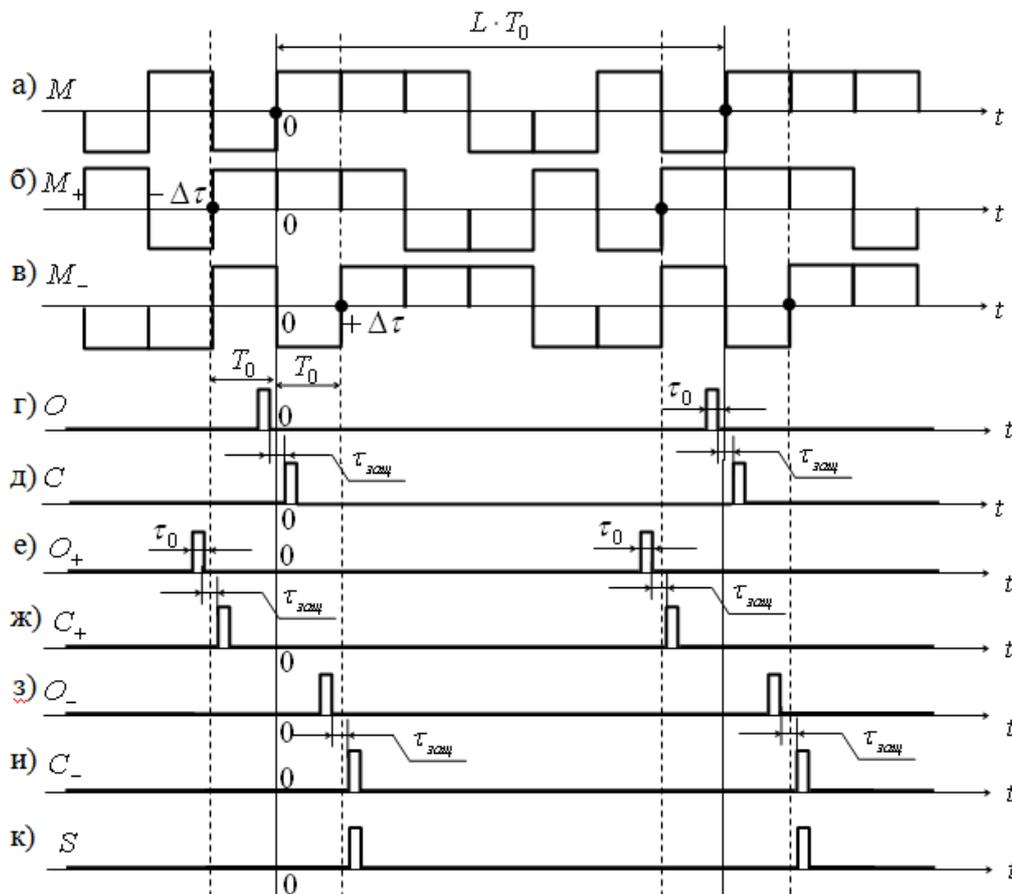


Рис. 2. Циклограмма M -последовательностей и управляющих импульсов

Частота УГТЧ при $\tau_{зщ} = \tau_0$ и скорости передачи данных V , Бод, равна

$$f_{ГТЧ} = V \cdot L \cdot T_0 / \tau_0.$$

В КЛС ФИУ из колебаний с частотой $f_{ГТЧ}$ формируется тактовая частота $f_T = 1/T_0$, для управления сдвигом последовательности в ячейках ГПСПИ, вычисляется результат $m2$ суммирования по модулю 2 для обратной связи в n -ячеечном регистре сдвига, формируются M -последовательности с периодом $L = 2^n - 1$ и управляющие импульсы.

В управляемом генераторе помехи (УГП) вырабатывается гармоническое колебание с фазой ψ_k^2 . Подстройка УГП осуществляется напряжением с экстраполятора \mathcal{E}_ψ . По существу, выделение оценочного значения аддитивной гармонической помехи выполняется при помощи системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с дискретным управлением. Так как в системах ФАПЧ опорное и синхронизируемое колебания сдвинуты по фазе на $\phi = 90^\circ$, то перед вычитанием оценочного значения помехи их наблюдения установлен фазовращатель на 90° .

Последовательность информационных символов снимается с выхода СС.

Синтезированный приёмник ФКМ-сигнала в условиях действия узкополосной помехи представляет собой систему, содержащую каналы выделения полезного сигнала и помехи, перед входами которых устанавливаются два вычитающих устройства, в одном из которых компенсируется помеха, а в другом – сигнал. Обобщённая структурная схема этой системы приведена на рис. 3.



Рис. 3. Обобщённая схема устройства обработки смеси сигнала и помехи

Качественные показатели синтезированного алгоритма характеризуются вероятностью ошибок различения. Качество функционирования разработанного на базе такого алгоритма устройства в целом определяется качеством работы блока синхронизации и качеством компенсации помехи в канале выделения сигнала и компенсации сигнала в канале выделения помехи. Поэтому оценка качества проведена для двух случаев.

1. Идеальная компенсация помехи и сигнала в соответствующих каналах. При этом оценивается помехоустойчивость приёма при различном качестве синхронизации.

2. Идеальная синхронизация в приёмнике ФКМ сигнала. При этом оценивается помехозащищённость приёмника как влияние качества компенсации помехи на качество приёма.

В первом случае при идеальной компенсации аддитивной узкополосной помехи сигнал наблюдается на фоне белого шума. Так как в алгоритм различения входят экстраполированные оценки синхропараметров, то вероятность ошибок различения будет зависеть от ошибок экстраполяции синхропараметров $\delta\lambda_k^\vartheta = \lambda_k - \lambda_k^\vartheta$, где λ – один из синхропараметров τ, φ ; λ_k и λ_k^ϑ – истинное и экстраполированное значения синхропараметра. Ошибка экстраполяции помехи равна нулю $\delta\psi_k^\vartheta = \psi_k - \psi_k^\vartheta$.

Представим правило решения о передаваемом информационном символе в виде

$$\Delta z = \Pi_k(\tau_k^\vartheta, \varphi_k^\vartheta | \theta_k = 1) - \Pi_k(\tau_k^\vartheta, \varphi_k^\vartheta | \theta_k = -1) \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} \begin{matrix} \gamma_k = 1 \\ \gamma_k = 0 \end{matrix} \quad (4)$$

Поскольку сигнал наблюдается в аддитивной смеси с белым гауссовским шумом, то закон распределения величины Δz будет нормальным. При учёте ортогональности сигналов, соответствующих различным символам дискретной информации и одинаковости автокорреляционных функций сигналов, плотность распределения вероятностей величины Δz при $\gamma = 1, 0$ для стационарного режима наблюдения ($k \gg 1$) записывается в виде

$$w(\Delta z | \gamma) = N(m_\gamma^{(1)} - m_\gamma^{(0)}; 2D_0),$$

где $m_\gamma^{(1)} = \begin{cases} q \cos(\delta\varphi_k^\vartheta) R(\delta\tau_k^\vartheta), & \gamma = 1; \\ 0 & \gamma = 0; \end{cases}$ $m_\gamma^{(0)} = \begin{cases} 0, & \gamma = 1; \\ -q \cos(\delta\varphi_k^\vartheta) R(\delta\tau_k^\vartheta), & \gamma = 0; \end{cases}$ –

средние значения величины Δz при различных γ ;

$$D_0 = \frac{1}{N} \int_{(k-1)LT_0 + \tau_k^\vartheta}^{kLT_0 + \tau_k^\vartheta} s_k^2(\theta_k, \tau_k, \varphi_k) dt$$
 – дисперсия величины Δz , не зависящая

от γ ; $q = A^2 T_0 / N$ – отношение сигнал/шум; $R(\delta\tau_k^\vartheta)$ – нормированная автокорреляционная функция ФКМ-сигнала.

При нормальном законе распределения величины Δz выражение для условной вероятности ошибок различения при фиксированных ошибках экстраполяции записывается в виде [10, 11]

$$P_e(\delta\varphi_k^\vartheta, \delta\tau_k^\vartheta) = \frac{1}{2} - \Phi_0 \left\{ \sqrt{q} \cos(\delta\varphi_k^\vartheta) R(\delta\tau_k^\vartheta) \right\}, \quad (5)$$

где $\Phi_0(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^b \exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\} dx$ – нормированная функция ошибок.

Безусловная вероятность ошибок различения определяется усреднением условной вероятности ошибок по плотности распределения вероятностей ошибок экстраполяции синхропараметров

$$P_e = \frac{1}{2} - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0 \left\{ \sqrt{q} \cos(\delta\varphi_k^{\vartheta}) R(\delta\tau_k^{\vartheta}) \right\} w(\delta\varphi_k^{\vartheta}, \delta\tau_k^{\vartheta}) d(\delta\varphi_k^{\vartheta}) d(\delta\tau_k^{\vartheta}), \quad (6)$$

где $w(\delta\varphi_k^{\vartheta}, \delta\tau_k^{\vartheta})$ – плотность распределения вероятностей ошибок синхропараметров, которая при независимых синхропараметрах факторизуется.

Реально пределы интегрирования выбираются исходя из значений апостериорных дисперсий синхропараметров. При высокой кратковременной стабильности синхропараметров фазовый набег несущего колебания в течение длительности импульса ФКМ-сигнала $\delta\varphi_k^{\vartheta}$ не превосходит 10...20 градусов, а ошибки экстраполяции $\delta\tau_k^{\vartheta}$ лежат в пределах главного максимума огибающей автокорреляционной функции ФКМ-сигнала.

Характеристики помехоустойчивости синтезированного приёмника приведены на рис. 4.

Увеличение кратковременной нестабильности синхропараметров приводит к возрастанию вероятности ошибки, причём при повышении кратковременной нестабильности наблюдается ослабление зависимости от отношения сигнал/шум: при $\delta f > 10^{-5}$ и $\delta\tau > 10^{-5}$ характеристика асимптотически переходит в горизонтальную линию. Следовательно, при высоких значениях кратковременной нестабильности повышение отношения сигнал/шум не приводит к повышению помехоустойчивости.

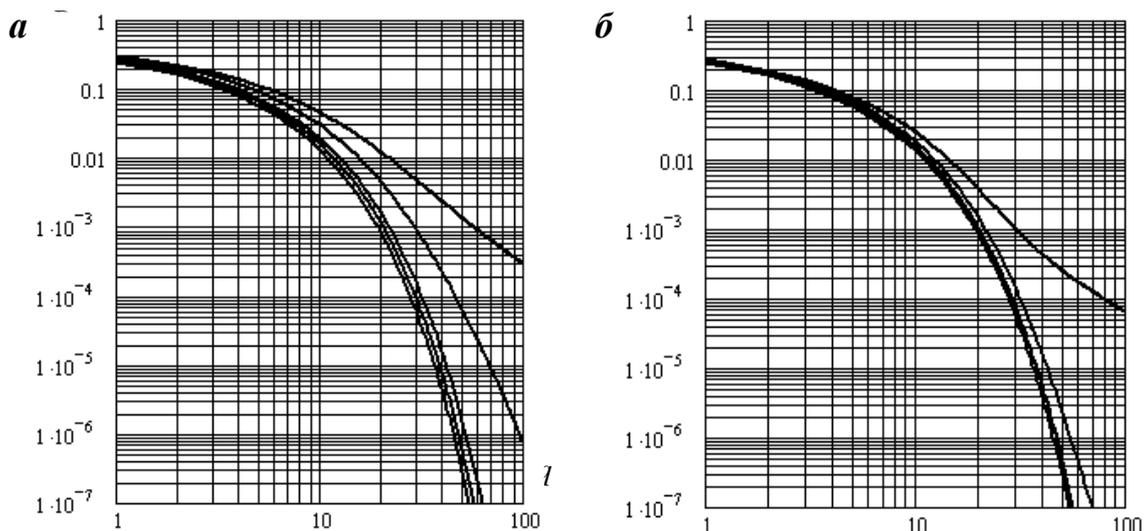


Рис. 4. Характеристики помехоустойчивости при различных значениях кратковременной нестабильности синхропараметров: а - задержки, б - фазы

Во втором случае при идеальной синхронизации помеха компенсируется не полностью из-за ненулевых ошибок экстраполяции фазы помехи $\delta\psi_k^\vartheta = \psi_k - \psi_k^\vartheta \neq 0$, и сигнал наблюдается в присутствии остатка некомпенсированной аддитивной узкополосной помехи и белого шума. Так как аналитические соотношения для вероятности ошибочного приёма в этом случае получать нецелесообразно, то оценка помехозащищённости проведена путём машинного моделирования. На рисунке 5 приведены характеристики помехозащищённости синтезированного приёмника, представляющие собой вероятности ошибки различения сигналов от отношения амплитуд сигнала и помехи $q_a = A/U_{\Pi}$ для трёх значений ошибок экстраполяции фазы помехи $\delta\psi_k^\vartheta = 5^\circ$, $\delta\psi_k^\vartheta = 10^\circ$ и $\delta\psi_k^\vartheta = 30^\circ$.

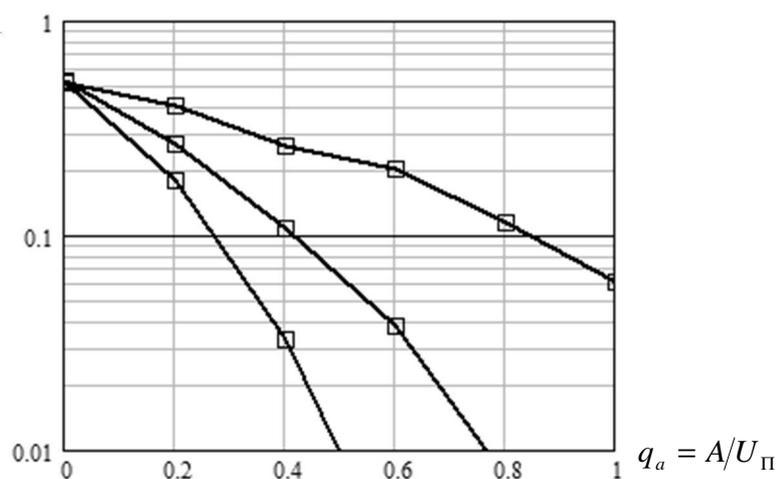


Рис. 5. Характеристики помехозащищённости:
 1 – при $\delta\psi_k^\vartheta = 5^\circ$; 2 – при $\delta\psi_k^\vartheta = 10^\circ$; 3 – при $\delta\psi_k^\vartheta = 30^\circ$.

Машинное моделирование синтезированного алгоритма позволило установить, что воздействие преднамеренной узкополосной помехи не сказывается на помехозащищённости приёмника при превышении помехи над сигналом не более чем в 5 раз с учётом неидеальности работы системы компенсации помехи. Разработанная методика исследований позволяет определить вид и параметры помехового воздействия для достижения заданного коэффициента подавления.

Таким образом, установлен принцип обработки ФКМ-сигналов с изменяющимся законом манипуляции фазы внутри импульса и синтезирован алгоритм приёма ФКМ-сигналов, в которой реализована корреляционная обработка при экстраполированных на один такт вперёд значениях синхропараметров с компенсацией узкополосной помехи перед системой обработки сигнала и компенсацией сигнала перед системой выделения уз-

кополосной помехи. Анализ качества синтезированного приёмника позволил установить пределы допустимых значений нестабильности частот синхронизируемых генераторов, при которых качество приёма близко к потенциально возможному, а также определить предельно допустимые ошибки компенсации помехи при сохранении вероятности ошибочного приёма не выше заданного значения.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 16-08-00832-а «Разработка научных основ алгоритмического и программно-математического обеспечения синтеза управления группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, функционирующими в антагонистической среде в условиях неполной ситуационной осведомленности».

Список литературы

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Тузов Г.И. Статистическая теория приёма сложных сигналов. М.: Сов. Радио, 1977. 400 с.
3. Ярлыков М.С. Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. М.: Сов. Радио, 1980. 358 с.
4. Ярлыков М.С. Оптимальный приём сигналов с внутриимпульсной частотной модуляцией // Радиотехника и электроника, 1971. Т. 16. №1. С. 58-67.
5. Шахгильдян В.В., Бурдзейко Б.П., Лютин В.И. Различение псевдослучайных сигналов и синхронизация // Теория и техника сложных сигналов: материалы всесоюзной научно-технической конференции. Москва – Минск, 1979.
6. Патент США № 2008/0137717 А1, опубл. 28 декабря 2008.
7. Лютин В.И., Федюнин Д.И. Различение и синхронизация сложных сигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией // Информатика: проблемы, методология, технологии: сборник материалов XVIII международной научно-методической конференции: в 7 т.; Воронежский государственный университет, 2018. С. 174-179.
8. Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи. М.: Связь, 1971.
9. Лютин В.И. Алгоритмы совместного различения и синхронизации при приёме сигналов дискретной информации // Обработка информации в системах связи: сб. трудов учебных институтов связи. Л.: ЛЭИС. 1981. С. 24-30.
10. Лютин В.И. Алгоритм автоматического слежения при наблюдении объектов в различных физических полях // Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн. 2001. № 10.

11. Лютин В.И. Технология комплексирования результатов наблюдений при высокоточном наведении с применением радиооптических систем // Кибернетика и высокие технологии XXI века: сборник трудов X Международной научно-технической конференции. Воронеж, 2009. т.1.

12. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный приём сигналов. М.: Сов.радио, 1975. 704 с.

13. Тихонов В.И., Степанов А.С. Совместная фильтрация непрерывных и дискретных марковских процессов // Радиотехника и электроника. 1973, Т.18. №7.

14. Чердынцев В. А. Статистическая теория совмещенных радиотехнических систем. Минск: Высшая школа. 1980.

15. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М.: Сов.радио, 1977. 608 с.

16. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. М.: Сов.радио, 1961. 644 с.

17. Лютин В.И., Ананьев А.В. Различение и синхронизация широкополосных сигналов с внутриимпульсной нелинейной частотной модуляцией на фоне белого шума и узкополосной аддитивной помехи // Телекоммуникации. 2018. №3. С. 18-28.

18. Ананьев А.В., Антипенский Р.В., Лютин В.И. Квазикогерентный прием радиосигналов с внутриимпульсной частотной модуляцией // Вестник военного авиационного инженерного университета (г. Воронеж). 2010. №4. С. 102-109.

19. Ананьев А.В., Лютин В.И. Различение и синхронизация сигналов с внутриимпульсной частотной модуляцией // Радиолокация навигация связь: докл. XVII Международной научно-технической конференции. Воронеж. 2011. С. 184-194.

20. Гаврилов К.Ю., Гончаренко В.И., Дубровин Н.А. Особенности создания и обучения нейросетевого радиопеленгатора // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 1. С. 32-40.

Лютин Владимир Иванович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, ljutin@mail.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" Министерства обороны Российской Федерации,

Ананьев Александр Владиславович, канд. техн. наук, докторант, sasha303_75@mail.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" Министерства обороны Российской Федерации,

Гончаренко Владимир Иванович, д-р техн. наук., доцент, директор Военного института, fvo@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ведущий научный сотрудник, Россия, Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

*DISCRIMINATION AND SYNCHRONIZATION OF PSEUDORANDOM SIGNALS WITH
INTRAIMPULSE PHASE MANIPULATION AGAINST THE WHITE NOISE AND THE
NARROW-BAND ADDITIVE NOISE*

V.I. Lyutin, A.V. Ananjev, V.I. Goncharenko

In paper on the basis of the theory of a joint filtration of discrete random and continuous Markov sequence the algorithm of operation of the quasicohherent receiver of the discrete wireless signals with intraimpulse phase manipulation against a white noise and a narrow-band additive noise is synthesized.

Key words: signal with intrapulse phase manipulation, noise immunity of radio communication lines, synthesis of the algorithm for receiving signals, interference immunity of radio communication lines.

Lyutin Vladimir Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, senior staff scientist, ljutin@mail.ru, Russia, Voronezh, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Professional Education Military Educational – Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh) of the Ministry of Defence of the Russian Federation,

Ananjev Alexandr Vladislavovich, candidate of technical sciences, doctoral candidate, sasha303_75@mail.ru, Russia, Voronezh, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Professional Education Military Educational – Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh) of the Ministry of Defence of the Russian Federation,

Goncharenko Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, docent, Director of the Military Institute, fvo@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University), Leading Researcher, Russia, Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ АНАЛИЗА И КОРРЕКЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИГНАЛОВ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ

А.В. Ананьев, В.И. Гончаренко, В.И. Лютин

Показано, что в настоящее время остается целый ряд нерешенных задач использования беспилотных аппаратов различных сред применения, в том числе слабые возможности бортовой обработки радиосигналов (гидроакустических сигналов) для оценки параметров, распознавания образов, обеспечения связи с быстродвижущимися объектами и др. На основе теории цифровой фильтрации предложены алгоритмы и проведён расчёт цифрового нерекурсивного устройства анализа и коррекции спектральной структуры сигналов. Алгоритмы позволяют разрешить неоднозначность между разрядностью коэффициентов цифровой системы и порядком цифровой цепи при достижении максимальной точности воспроизведения характеристик анализа спектральной структуры сигналов. Кроме того, разработанные алгоритмы могут быть использованы для коррекции амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик широкополосных каналов связи для быстродвижущихся объектов. Практическая значимость работы заключается в рациональном использовании ресурса цифровых схем.

Ключевые слова: беспилотный аппарат, обработка сигналов, спектральная структура сигнала, цифровое устройство анализа и коррекции сигнала.

Задача анализа внутриимпульсной частотной и эквивалентной ей по значимости фазовой структуры сигналов приобретает особое значение в современных условиях и находит свое применение в самых различных областях как при решении задач начального уровня, включающих оценку параметров сигналов, так и при решении наиболее сложных задач – распознавания образов объектов. Обработка сигналов в интересах оценки параметров и распознавания образов в настоящее время во многом решается успешно, однако при этом задействуется крупногабаритная аппаратура радиотехнического анализа. Информация о радиосигнале (гидроакустическом сигнале) должна быть доставлена непосредственно в некоторую аппаратуру со средствами анализа сигналов, что в ряде случаев затруднительно, а зачастую – невозможно. Так, например, существуют задачи удаленного распознавания и контроля источников сигналов, выполнение которых может быть успешно решено с использованием беспилотных систем (БС) воздушного, наземного, надводного или подводного базирования [1, 2]. Необходимость удаленного измерения параметров (распознавания объектов) в свою очередь обусловлено большими зонами контролируемых территорий, труднодоступностью объектов контроля, зонами чрезвычайных ситуаций (опасностью применения пилотируемых судов, средств) [3-5]. В этом случае, как правило, для приема сигналов используются бортовые датчики БС, а затем осуществляется передача данных бортовых изме-

рений в пункт обработки информации или же производится расшифровка наблюдений после возвращения беспилотного аппарата. Передача данных с борта существенно затрудняется загруженностью радиочастотного и акустического диапазонов, а обработка данных после прибытия ведет к большой инертности систем технического контроля. Таким образом, возникает задача повышения эффективности обработки сигналов непосредственно на борту БС.

Другой важной задачей при применении БС, является реализация устойчивого информационного обмена при передаче больших объемов данных, например, фото и видео с борта быстро движущихся беспилотных летательных аппаратов. В это случае также необходима обработка сигналов, прежде всего коррекция группового времени запаздывания [6].

Для повышения возможностей бортовой обработки сигналов, в ряде работ предложены модели устройства с наклонной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) [7, 8], которые доведены до реализаций на уровне схмотехнического моделирования в различных элементных базисах: ARC-элементном (для гидроакустических систем) [9,10] и LC-элементном для радиотрактов до десятков МГц [11-13], а также разработана специализированная САПР [14]. В то же время представляет интерес цифровой элементный базис, при этом с точки зрения устойчивости к самогенерации и минимума искажений фазочастотной характеристики (ФЧХ) актуально применение нерекурсивных цифровых устройств [15-19]. Однако специфика данной задачи заключается в несимметрии АЧХ относительно центральной частоты, так как коррекция полосового канала связи подразумевает наклон АЧХ, что не позволяет применить методы синтеза, основанные на использовании низкочастотных нерекурсивных фильтров-прототипов, и накладывает ограничения на применение рекурсивные цифровых фильтров. В связи с этим задача синтеза полосовых нерекурсивных фильтров является актуальной.

Целью исследований является разработка методики синтеза и программного обеспечения для проведения машинной оптимизации нерекурсивного цифрового полосового фильтра с линейной наклонной частотной характеристикой.

Пусть отсчеты фильтруемого сигнала следуют с частотой дискретизации f_0 , при этом период дискретизации равен

$$T = 1/f_0. \quad (1)$$

Синтез будет выполняться при нормированной частоте

$$\omega = f/f_0. \quad (2)$$

Желаемая амплитудно-частотная характеристика имеет линейный подъём, как показано на рис. 1, сплошной наклонной линией показана возрастающая АЧХ, пунктирной – убывающая.

В пределах между нижней $\omega_{-ч}$ и верхней $\omega_{ч}$ граничными частотами полосы пропускания АЧХ описывается выражением:

$$H_L(\omega) = \begin{cases} \frac{\omega - \omega_{-ч}}{\omega_{ч} - \omega_{-ч}} \cdot a & \text{при возрастающей АЧХ} \\ \frac{\omega_{ч} - \omega}{\omega_{ч} - \omega_{-ч}} \cdot a & \text{при убывающей АЧХ} \end{cases}. \quad (3)$$

Величиной a задаётся подъём АЧХ на верхней/нижней граничной частоте полосы пропускания. При частотах, лежащих ниже нижней $\omega_{-к}$ (до 0) и выше верхней $\omega_{к}$ (до 0,5) граничных частот нижней и верхней полос задерживания, желаемое значение АЧХ равно нулю.

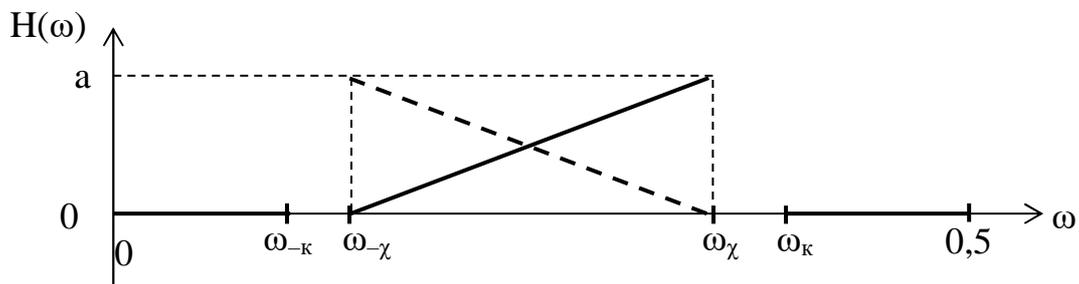


Рис. 1. Желаемая АЧХ полосового фильтра

Аналитическое описание АЧХ имеет вид

$$H(\omega) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega \leq \omega_{-к}, \\ H_L(\omega), & \omega_{-ч} \leq \omega \leq \omega_{ч}, \\ 0, & \omega_{к} \leq \omega \leq 0,5. \end{cases} \quad (4)$$

В общем случае на выходе фильтра нужно обеспечить требуемую форму спектра сигнала $S(\omega)$. При этом надо учитывать влияние на форму спектра сигнала на выходе цифрового фильтра цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Пример формирования сигнала на выходе ЦАП приведён на рис. 2.

Амплитудный спектр последовательности импульсов $\{x_k, k = 1, 2, 3, \dots\}$ отличается от амплитудного спектра сигнала $x(t)$ множителем $\frac{\sin \omega T / 2}{\omega T / 2}$.

Конечная длительность ступенчатых импульсов $t_u \leq T$ на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) учитывается введением поправочного множителя

$$k(\omega) = \left(2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \frac{t_u}{T} \right) / \sin \left(2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \frac{t_u}{T} \right). \quad (5)$$

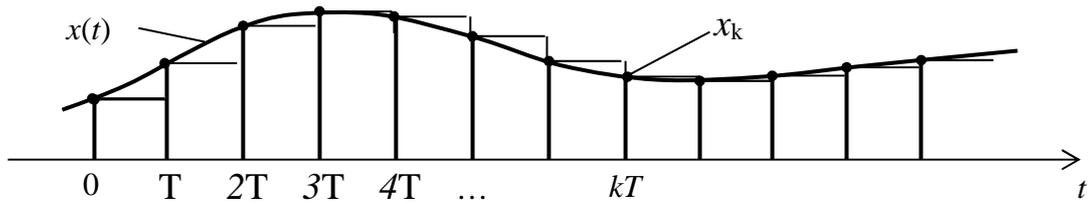


Рис. 2. Форма сигнала на выходе ЦАП

С учётом влияния АЦП выражение для АЧХ примет вид

$$H_T(\omega) = H(\omega) \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \frac{t_u}{T}}{\sin\left(2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \frac{t_u}{T}\right)}. \quad (6)$$

При $t_u = T$ выражение для АЧХ с учётом влияния АЦП упрощается

$$H_T(\omega) = H(\omega) \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega}{\sin(2 \cdot \pi \cdot \omega)}. \quad (7)$$

Ввиду несимметричности АЧХ относительно центральной частоты, что обусловлено требованием обеспечения заданного наклона и конечностью длительности импульсов на выходе АЦП, не представляется возможным применить для синтеза методы проектирования фильтров нижних частот. Поэтому проведём синтез расчётных аналитических соотношений для импульсных характеристик нерекурсивных полосовых фильтров.

Синтез выполним для нерекурсивного полосового цифровых фильтра с чётной импульсной характеристикой нечётным числом отводов. Примем порядок фильтра, определяемый числом отсчётов импульсной характеристики, равным N . Обозначим отсчёты импульсной характеристики как a_n , $n = \overline{1, N}$.

На рис. 3 приведен пример импульсной характеристики выбранного фильтра. При симметрии импульсной характеристики синтезируемый фильтр будет иметь линейную фазочастотную характеристику.

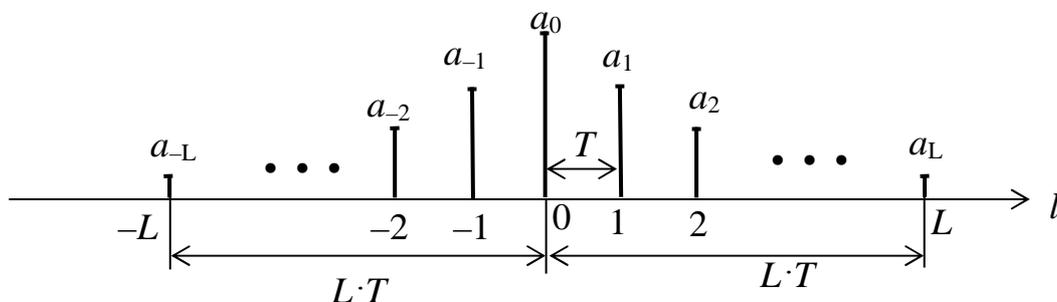


Рис. 3. Вид импульсной характеристики фильтра

С учётом чётности импульсной характеристики, обозначим коэффициенты как

$$c_0 = a_0, c_l = 2a_l, \quad (8)$$

где $L = (N - 1)/2$.

Примем, что АЧХ аппроксимируется косинус-преобразованием Фурье

$$A(\omega, \vec{c}) = \sum_{l=0}^L c_l \cos(l2\pi\omega). \quad (9)$$

Синтез фильтра будем проводить в соответствии с критерием минимума среднего квадрата отклонения аппроксимирующей АЧХ от желаемой АЧХ фильтра. Для этого составим выражение для целевой функции в виде

$$G(\vec{c}) = \int_0^{0,5} q(\omega) \cdot [H_T(\omega) - A(\omega, \vec{c})]^2 d\omega, \quad (10)$$

где $q(\omega)$ – весовая функция, определяющая точность приближения аппроксимирующей функции к желаемой АЧХ в разных участках частотного диапазона.

Зададим весовую функцию в виде

$$q(\omega) = \begin{cases} g_1, & 0 \leq \omega \leq \omega_{-к}, \\ 1, & \omega_{-х} \leq \omega \leq \omega_х, \\ g_2, & \omega_к \leq \omega \leq 0,5. \end{cases} \quad (11)$$

Точность приближения аппроксимирующей АЧХ к желаемой АЧХ в полосе пропускания и в полосах задерживания одинакова при $g_{1,2} = 1$, выше при $g_{1,2} < 1$, ниже при $g_{1,2} > 1$.

Значения коэффициентов импульсной характеристики определяются из условия минимума целевой функции. Вычисляя производную от целевой функции и приравнивая её к нулю, получим

$$\int_0^{0,5} q(\omega) H_T(\omega) \frac{\partial A(\omega, \vec{c})}{\partial c_n} d\omega = \int_0^{0,5} q(\omega) A(\omega, \vec{c}) \cdot \frac{\partial A(\omega, \vec{c})}{\partial c_n} d\omega, \quad n = \overline{0, L}. \quad (12)$$

Производная от аппроксимирующей функции равна

$$\frac{\partial A(\omega, \vec{c})}{\partial c_n} = \sum_{l=0}^L \cos(l2\pi\omega) \frac{\partial c_l}{\partial c_n}. \quad (13)$$

Производная от коэффициентов равна

$$\frac{\partial c_l}{\partial c_n} = \begin{cases} 1, & l = n, \\ 0, & l \neq n. \end{cases} \quad (14)$$

С учётом этого, получим

$$\frac{\partial A(\omega, \vec{c})}{\partial c_n} = \cos(n2\pi\omega), \quad n = \overline{0, L}. \quad (15)$$

Подставляя найденное значение в подынтегральные выражения (12), получим

$$\int_0^{0.5} q(\omega) H_T(\omega) \cos(n2\pi\omega) d\omega = \int_0^{0.5} q(\omega) A(\omega, \vec{c}) \cos(n2\pi\omega) d\omega. \quad (16)$$

Обозначим левую часть равенства (16) через d_n и представим подынтегральное выражение с учётом выражений (5,6,7) и при $t_u = T$ в виде

$$d_n = \begin{cases} a \cdot \int_{\omega_{-\chi}}^{\omega_{\chi}} \frac{\omega - \omega_{-\chi}}{\omega_{\chi} - \omega_{-\chi}} \cdot \frac{2\pi\omega}{\sin(2\pi\omega)} \cos(n2\pi\omega) d\omega, & n = \overline{0, L} \text{ привозрастающей АЧХ} \\ a \cdot \int_{\omega_{-\chi}}^{\omega_{\chi}} \frac{\omega_{\chi} - \omega}{\omega_{\chi} - \omega_{-\chi}} \cdot \frac{2\pi\omega}{\sin(2\pi\omega)} \cos(n2\pi\omega) d\omega, & n = \overline{0, L} \text{ при убывающей АЧХ} \end{cases} \quad (17)$$

Подставляя в правую часть (16) выражение (9), обозначая левую часть через d_n и меняя правую и левую части местами, получим систему $L+1$ линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных c_l , $l = \overline{0, L}$

$$\sum_{l=0}^L c_l \cdot d_{nl} = d_n, \quad n = \overline{0, L}, \quad (18)$$

где

$$d_{nl} = \frac{1}{2} \int_0^{0.5} q(\omega) \cos[(n-l)2\pi\omega] d\omega + \frac{1}{2} \int_0^{0.5} q(\omega) \cos[(n+l)2\pi\omega] d\omega.$$

Выполняя интегрирование и учитывая значения весовой функции, определим значения коэффициентов при различных значениях индексов n и l .

При $n = l = 0$

$$d_{00} = g_1 \omega_{-\kappa} + \omega_{\chi} - \omega_{-\chi} + \frac{g_2}{2} - g_2 \omega_{\kappa}. \quad (19)$$

При $n = l \neq 0$

$$d_{nl} = \frac{g_1 \omega_{-\kappa}}{2} + \frac{g_1}{2} \cdot \frac{\sin[(n+l)2\pi\omega_{-\kappa}]}{(n+l)2\pi} + \frac{\omega_{\chi}}{2} - \frac{\omega_{-\chi}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin[(n+l)2\pi\omega_{\chi}]}{(n+l)2\pi} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin[(n+l)2\pi\omega_{-\chi}]}{(n+l)2\pi} + \frac{g_2}{4} - \frac{g_2 \omega_{\kappa}}{2} - \frac{g_2}{2} \cdot \frac{\sin[(n+l)2\pi\omega_{\kappa}]}{(n+l)2\pi}. \quad (20)$$

При $n \neq l \neq 0$

$$d_{nl} = \frac{g_1}{2} \cdot \frac{\sin[(n-l)2\pi\omega_{-k}]}{(n-l)2\pi} + \frac{g_1}{2} \cdot \frac{\sin[(n+l)2\pi\omega_{-k}]}{(n+l)2\pi} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin[(n-l)2\pi\omega_{-z}]}{(n-l)2\pi} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin[(n-l)2\pi\omega_{-z}]}{(n-l)2\pi} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin[(n+l)2\pi\omega_{-z}]}{(n+l)2\pi} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin[(n+l)2\pi\omega_{-z}]}{(n+l)2\pi} - \frac{g_2}{2} \cdot \frac{\sin[(n-l)2\pi\omega_k]}{(n-l)2\pi} - \frac{g_2}{2} \cdot \frac{\sin[(n+l)2\pi\omega_k]}{(n+l)2\pi} \quad (21)$$

С применением полученных выражений проведён анализ качества синтезированных фильтров при различном числе ($N=7, 15, 31, 63, 127, 255$) и различной разрядности коэффициентов ($n=4, 8, 12, 16, 20, 24, 32$). Качество аппроксимации оценивалось величиной среднеквадратического отклонения (СКО) аппроксимирующей функции от желаемой АЧХ в пределах полосы пропускания

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\omega_{\chi} - \omega_{-\chi}} \int_{\omega_{-\chi}}^{\omega_{\chi}} [H_T(\omega) - A(\omega, \vec{a})]^2 d\omega} \quad (22)$$

На рис. 4 приведены результаты расчётов зависимости СКО от разрядности коэффициентов фильтра при различном числе отводов. Весовая функция в полосах пропускания и задерживания принята равной 1. Расчёты выполнены для условий, приведённых в таблице.

Исходные данные для анализа качества аппроксимации АЧХ

Обозначение на рис. 4	Наклон АЧХ	ω_{-k}	ω_{-z}	ω_z	ω_k
а	возрастающий	0,25	0,3	0,4	0,45
б	убывающий				
в	возрастающий	0,05	0,1		
г	убывающий				

В результате расчётов нерекурсивного цифрового фильтра установлено, что достижение СКО менее 10^{-4} или 80 дБ происходит при числе отводов фильтра более 63 и разрядности коэффициентов не менее 16. Увеличение разрядности коэффициентов более 16 при числе отводов 127 не приводит к повышению качества аппроксимации АЧХ.

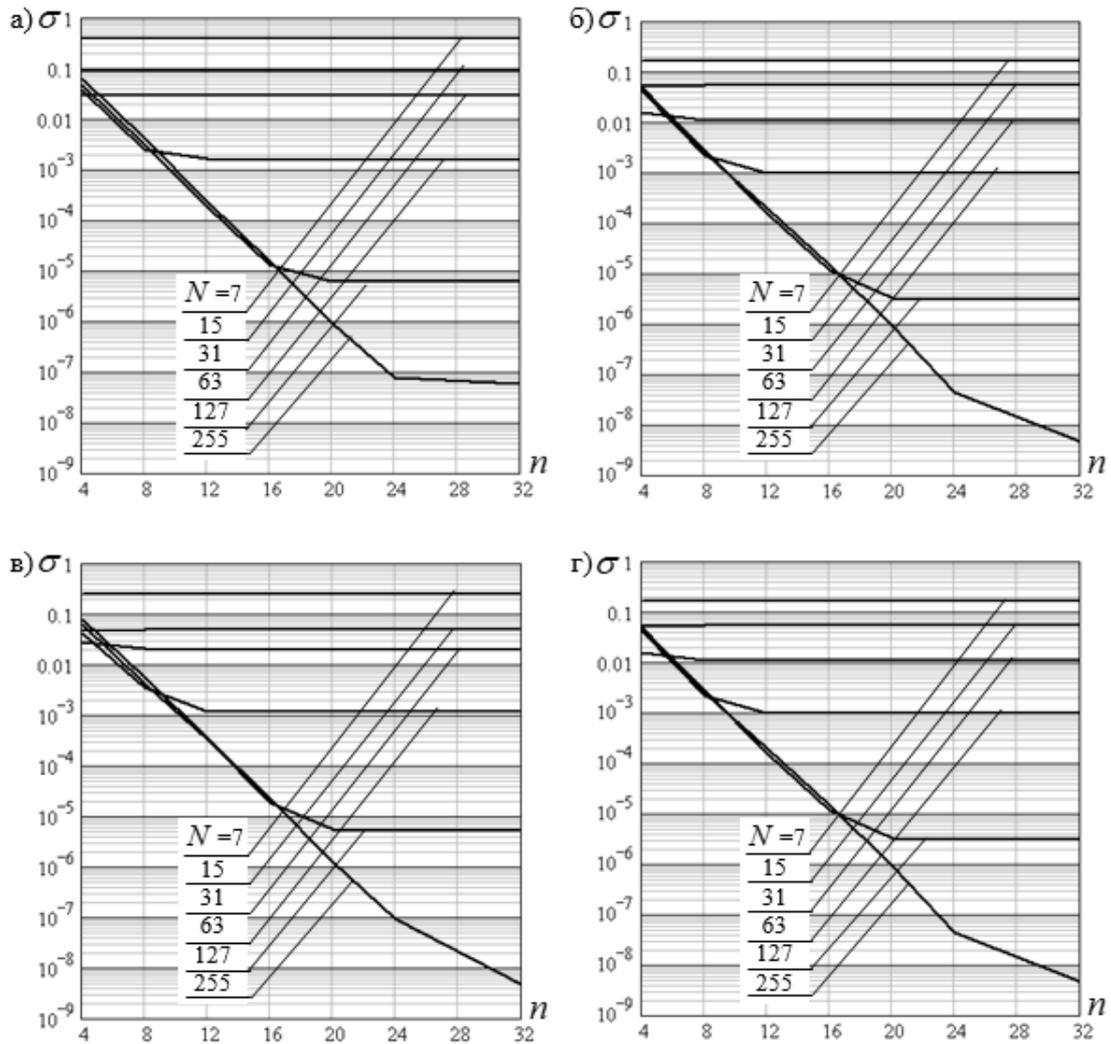


Рис. 4. Зависимости среднеквадратического отклонения аппроксимирующей функции от желаемой АЧХ в пределах полосы пропускания

Таким образом, в результате проведенных исследований получены аналитические выражения для определения коэффициентов нерекурсивного цифрового фильтра с наклонной частотной характеристикой. По результатам анализа установлено, что для каждого значения числа отводов фильтра может быть определена минимальная разрядность коэффициентов, при которой достигается требуемое качество аппроксимации. Полученные результаты могут быть положены в основу оптимальной разработки бортовых датчиков анализа тонкой структуры сигналов беспилотных летательных аппаратов.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 16-08-00832-а «Разработка научных основ алгоритмического и программно-математического обеспечения синтеза управления группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, функционирующими в антагонистической среде в условиях неполной ситуационной осведомленности».

Список литературы

1. Радиоконтроль с помощью беспилотников: материалы доклада заседания правительственной комиссии по федеральной связи и технологическим вопросам [Электронный ресурс] URL: <http://bp-la.ru/radiokontrols-promoshhyu-bespiilotnikov>. (дата обращения: 06.05.2018).
2. Anan'ev A.V., Goncharenko V.I. Scenario planning of activities of the group of aeronautical robotic engineering complexes in cooperative environments // 2017 Tenth International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD'2017), (Moscow, Russia, 2-4 Oct. 2017). Publisher: IEEE. Date Added to IEEE Xplore: 16 November 2017. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109591. IEEE Xplore Digital Library [Электронный ресурс] URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8109591> (дата обращения: 10.06.2018).
3. Абросимов В.К., Гончаренко В.И. Агентные технологии мониторинга районов чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. 30.06.2015. Вып. 3 (61). С. 188-196 [Электронный ресурс] URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения: 10.06.2018).
4. Гончаренко В.И., Лэ Луо, Прус М.Ю. Мониторинг распространения лесных пожаров группировкой беспилотных летательных аппаратов // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. 31.08.2015. Вып. 4 (62). С. 154-163 [Электронный ресурс] URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>. (дата обращения: 10.06.2018).
5. Абросимов В.К., Гончаренко В.И. Мониторинг чрезвычайной ситуации группой разнотипных беспилотных летательных аппаратов // Наукоемкие технологии. 2016. Т. 17. №9. С. 40-48.
6. Ананьев А.В. Компенсация эффекта Доплера в комплексах связи воздушного эшелона объединенной автоматизированной системы связи ВС РФ // Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией: сб. ст. по материалам V Всероссийской научн.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА». 2016. С. 7-10.
7. Патент 2574285 РФ. Частотный детектор / А.В. Ананьев, Б.Ф. Змий. Опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4.
8. Патент 2604336 РФ. Способ формирования характеристик преобразования частоты в напряжение / А.В. Ананьев, Б.Ф. Змий., Т.М. Хакимов. Опубл. 10.12.2016. Бюл. № 34.
9. Ананьев А.В. Синтез низкочастотных устройств с убывающей амплитудно-частотной характеристикой с N+3 равными отклонениями от линейного закона на интервале аппроксимации // Телекоммуникации. 2015. №5. С. 5-12.
10. Ананьев А.В., Змий Б.Ф. Синтез симметричных схем широкополосных преобразователей частоты в напряжение // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. №8. С. 55-61.

11. Ананьев А.В., Змий Б.Ф. Метод синтеза широкополосных пассивных измерителей девиации частоты в LC-элементном базисе // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. №12. С.3-11.
12. Ананьев А.В. Синтез лестничных LC-схем с амплитудно-частотными характеристиками оптимально приближенными по Чебышеву к произвольному закону // Телекоммуникации. 2016. №8. С. 2-8.
13. Ананьев А.В., Змий Б.Ф. Синтез полосовых линейных устройств с наклонной амплитудно-частотной характеристикой // Телекоммуникации. 2014. №5. С. 9-14.
14. Ананьев А.В. Автоматизированный синтез устройств обработки сигналов с неклассическими частотными характеристиками в Sim-One Circuit Designer // Автоматизация в промышленности. 2017. №9. С.29-33.
15. Гаврилов К.Ю., Гончаренко В.И., Дубровин Н.А. Особенности создания и обучения нейросетевого радиопеленгатора // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 1. С. 32-40.
16. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк. М.Н. Цифровая обработка сигналов. Справочник. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.
17. Каппелини В., Константинодис А.Дж., Эмилиани П. Цифровые фильтры и их применение. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
18. Цифровые фильтры в электросвязи и радиотехнике / Брунченко А.В. и др.; Под ред. Л.М. Гольденберга. М.: Радио и связь, 1982. 224 с.
19. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.

Ананьев Александр Владиславович, канд. техн. наук, докторант, sasha303 75@mail.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" Министерства обороны Российской Федерации,

Гончаренко Владимир Иванович, д-р техн. наук., доцент, директор Военного института, fvo@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ведущий научный сотрудник, Россия, Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Лютин Владимир Иванович, канд. техн. наук., доцент, старший научный сотрудник, ljutin@mail.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" Министерства обороны Российской Федерации

**SPECTRAL STRUCTURE SIGNAL ANALYSIS AND CORRECTION
DIGITAL DEVICES DESIGN FOR AUTONOMIC ROBOTICS SYSTEMS**

A.V. Ananjev, V.I. Goncharenko, V.I. Lyutin

Pilotless devices of the various environments of application: underwater, terrestrial, flying, space and their hybrid variants already are intensively enough used now also the future without them it is not obviously possible. Together with it there is variety of unresolved

problems, including low possibilities of onboard handling of wireless signals (hydroaudible tones) for the decision of tasks of an estimation of parameters, image identifications, supports of communication with fast-moving objects, etc. In represented by authors paper on the basis of the theory digital filtrations are developed algorithms and calculation digital the nonrecursive device of the analysis and correction of spectral structure of signals is carried out. Algorithms are intended for ambiguity resolution between digit capacity of coefficients digital systems and value of the order digital to a circuit at achievement of the maximum accuracy of playback of characteristics of the analysis of spectral structure of signals. The urgency of the developed scientifically-methodical device is caused by permanently present restriction of a resource digital circuits that is especially characteristic for means of the onboard analysis of signals robotics systems. Besides, the developed algorithms can be used for correction of the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of broadband channels of communication that is especially actual for fast-moving objects. Practical significance of operation consists in rational usage of a resource digital circuits.

Key words: unmanned vehicle, signal processing, spectral signal structure, digital signal analysis and correction device.

Ananjev Alexandr Vladislavovich, candidate of technical sciences, doctoral candidate, sasha303_75@mail.ru, Russia, Voronezh, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Professional Education Military Educational – Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh) of the Ministry of Defence of the Russian Federation,

Goncharenko Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, docent, Director of the Military Institute, fvo@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University), Leading Researcher, Russia, Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,

Lyutin Vladimir Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, senior staff scientist, ljutin@mail.ru, Russia, Voronezh, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Professional Education Military Educational – Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh) of the Ministry of Defence of the Russian Federation

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СКООРДИНИРОВАННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИРУЕМОЙ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖАДНЫХ АЛГОРИТМОВ

В.А. Овчаров, И.А. Ушаков, Н.А. Трофимова, Н.А. Лишин

В статье описана технология выявления скоординированного горизонтального сканирования объектов мониторируемой сетевой инфраструктуры. Разработан алгоритм построения результирующего покрывающего множества на основе набора сканирований с несколькими источниками, опирающийся на принципы работы жадных алгоритмов. Предложены методы последующего интеллектуального анализа данных, полученных с применением данного алгоритма.

Ключевые слова: скоординированное сканирование, жадные алгоритмы, профиль сканирования.

В настоящее время одним из наиболее распространенных и эффективных технических методов сбора информации об удаленной системе потенциальным нарушителем является сканирование TCP-/UDP-портов с использованием различных утилит типа Nmap/Zmap, NESCA, Masscan, X-scan, Router Scan, Adv. IP Scanner, XSpider/MaxPatrol и др. С помощью соответствующего инструментария, путем отправки пакетов данных и анализа ответов, могут быть исследованы работающие в системе службы (mail-сервер, FTP-сервер, web-сервер и др.). Соответственно, далее под сканированием будем понимать процесс определения характеристик одного или более удаленных хостов и/или сетей.

Уязвимости, связанные с открытыми портами, позволяют нарушителю получить и систематизировать следующую информацию:

- о проблемах безопасности и стабильности, связанных с функционированием системного программного обеспечения (ПО) удаленного хоста;
- о проблемах безопасности и стабильности, связанных с функционированием прикладного ПО, представляющего соответствующие сервисы.

В настоящее время особый интерес в практике расследования инцидентов информационной безопасности (ИБ) [8] представляют горизонтальные сканирования, т.к. они составляют 60-70% от всех типов сканирований [4]. Соответственно, определение факта их наличия в мониторируемой ИТКС является актуальной задачей.

Особенности выявления СС потребовали уточнения ряда терминов и понятий из работ [1, 3, 4, 6], а также введения ряда определений.

Термины и определения. Если между хостами-источниками существует некий уровень взаимодействия (координации), то такое сканирование будем называть *скоординированным*. При этом, в целях обфускации,

нарушитель может делить целевое пространство IP-адресов между несколькими источниками сканирования таким образом, что каждый из них сканирует только определенную его часть. Назовем такие процессы сканирования с одним источником (СОИ), где элементами набора СОИ являются IP-адреса цели. Как правило, контролируемое адресное пространство, представляющее собой определенное подмножество всего пространства сети, является непрерывным, за исключением хостов с уникальными портами.

Таким образом, скоординированное сканирование (СС) необходимо рассматривать как несколько циклов СОИ. Преимущества такого сканирования для нарушителя вполне очевидны – высокая скорость сбора информации об удаленной системе и дискретность собираемых данных.

Источник сканирования (ИсС) – компьютерная система (хост), сегмент или отдельная информационно-телекоммуникационная сеть (ИТКС), из которой направлена сетевая активность в отношении заданной цели сканирования.

Определим в качестве *профиля сканирования* множество комбинаций (a, p) , где $a \in A, p \in P$. Здесь A – набор сканируемых IP-адресов, размерность которого может принимать значения «один», «несколько» или «все»; P – набор сканируемых TCP-/UDP-портов, размерность которого может принимать значения «один» или «несколько». Профиль сканирования, как правило, имеет различную геометрию, характеризует цель ИсС, определяемую в соответствии с выбранной нарушителем стратегией и, следовательно, основывается на одной из моделей сканирования, классифицируемых по количеству сканируемых IP-адресов:

1. «Многие-к-одному»:

– вертикальное сканирование (*несколько* ИсС сканируют несколько (≥ 5) TCP-/UDP-портов из всего диапазона на *одном* IP-адресе цели) (рис. 1).

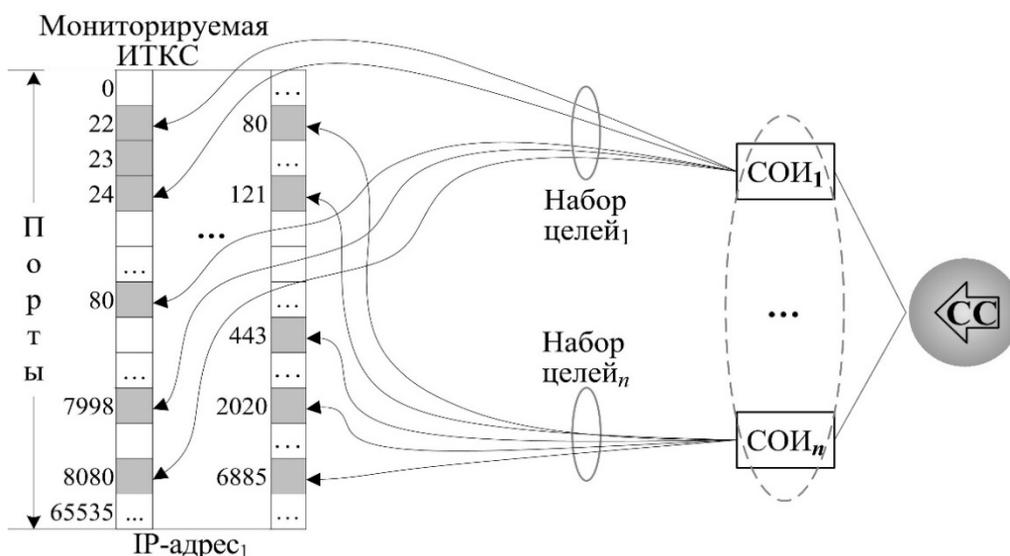


Рис. 1. Модель скоординированного сканирования «многие-к-одному»: вертикальное сканирование

2. «Многие-ко-многим». Эта модель сканирования, в свою очередь, делится на три типа в зависимости от количества сканируемых портов:

- горизонтальное сканирование (несколько ИС (≥ 5) сканируют один порт на нескольких IP-адресах цели из всего диапазона) (рис. 2, а);
- стробирующее сканирование (несколько ИС (> 1) сканируют один или несколько портов из множества TCP-/UDP-портов на нескольких (> 1) IP-адресах цели) (рис. 2, б);
- блок-сканирование (несколько ИС (> 1) сканируют несколько TCP-/UDP-портов из всего диапазона на нескольких (> 1) IP-адресах цели) (рис. 2, в).

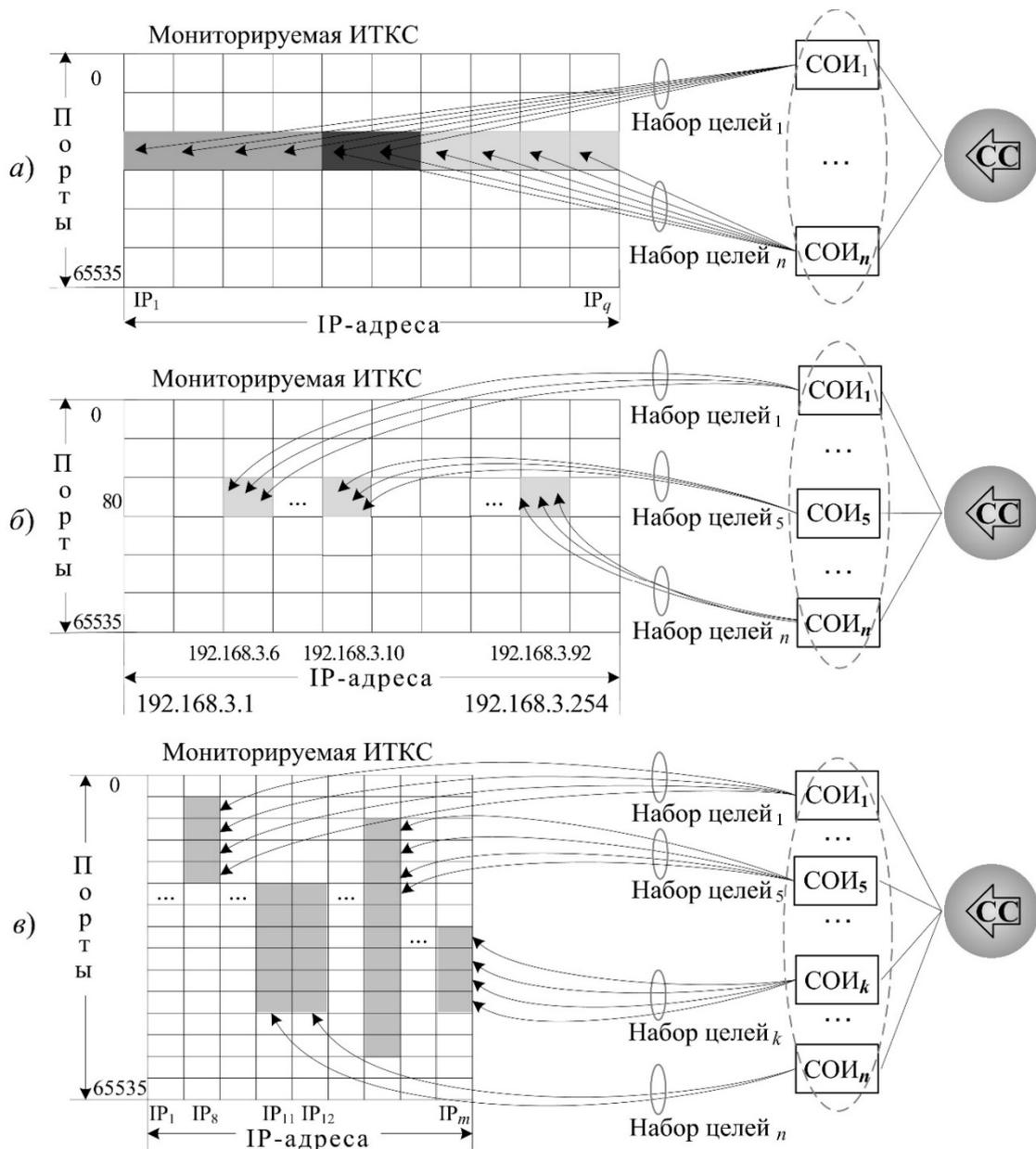


Рис. 2. Модель скоординированного сканирования «многие-ко-многим»:
а – горизонтальное сканирование; б – стробирующее сканирование;
в – блок-сканирование

Если в случае СС объединить все наборы СОИ, проведенные таким образом, что они охватывают всю ИТКС, то обобщенный профиль сканирования будет иметь ту же, определенную геометрию.

Специфика выявления и основные характеристики процессов сканирования портов

Процедуру сканирования TCP-/UDP-портов разделим на два типа: неориентированное (автоматизированное, например, используемое вредоносным ПО), предшествующее этапу заражения удаленной системы без ориентации на конкретную специфичную цель, и направленное (интеллектуальное), выполняемое нарушителем для сбора информации о конкретной удаленной системе (цели) или группе хостов. Очевидно, что только направленное сканирование может являться частью скоординированного сканирования.

Основной характеристикой направленного сканирования TCP-/UDP-портов является покрытие. Например, если сканируется конкретный порт каждого IP-адреса ИТКС, то покрытие – это количество одновременно исследуемых IP-адресов в ИТКС. Если все исследуемые порты принадлежат одному IP-адресу, то покрытие – количество соседних TCP-/UDP-портов. При этом *коэффициент покрытия X* – это отношение размера непрерывного адресного пространства к размеру мониторируемого.

Как уже было отмечено выше, истинная цель сканирования может быть скрыта нарушителем посредством применения различных технологий обфускации, например, включения в мониторируемое пространство дополнительных IP-адресов, а также использованием перекрывающихся диапазонов адресного пространства различными ИС. Определим в качестве *коэффициента перекрытия Y* – отношение количества одинаковых целей нескольких ИС к их общему количеству.

Еще одной важной характеристикой направленного сканирования является *коэффициент охвата Z* , определяемый количеством целевых IP-адресов в пределах сканируемого диапазона. Например, если в анализируемой ИТКС всего 256 IP-адресов, а в диапазоне 100 IP-адресов исследуется 64 из них, то $X = 100/256$, $Z = 64/100$.

Технология определения наличия СС в мониторируемой ИТКС состоит в выявлении характерных закономерностей в собираемой от нескольких источников информации (нахождении профиля сканирования). Профиль сканирования также однозначно указывает на область, в которой взаимодействуют ИС для достижения скрытности проводимых процедур.

Решением задачи выявления профиля в СС является построение такого подмножества наборов СОИ (назовем его результирующим), проведенных в некоторый промежуток времени и охватывающих всю ИТКС, анализ которого обеспечит определение конкретной геометрии профиля, приводящей к отождествлению с соответствующей моделью сканирования, используемой нарушителем.

Процесс построения результирующего множества сводится к нахождению непрерывного покрытия для некоторого сегмента ИТКС с возможной последующей максимизацией данного показателя. При этом, результирующее множество может быть дополнительно ограничено за счет минимизации перекрытия между соседними наборами СОИ. Результатом решения данной задачи не обязательно является *минимальное* количество наборов СОИ, покрывающих *всю* сеть. Основываясь на предположении о том, что «наименьшие» сканирования, охватывающие малое количество целей, с большей вероятностью могут быть частью скоординированного сканирования, алгоритм должен строить результирующее множество, начиная с выбора элементов с наименьшим покрытием.

Таким образом, результирующее множество должно удовлетворять следующим требованиям:

1. Состоять из более чем одного элемента.
2. Иметь покрытие максимально больше заданного.
3. Входящие в него подмножества должны иметь минимальное перекрытие, которое меньше заданного.
4. Иметь охват, близкий к требуемому.

В данной статье разработан алгоритм формирования результирующего множества S с последующим его анализом для выявления профиля скоординированного горизонтального сканирования.

Задачу обнаружения скоординированного сканирования (при условии, что оно присутствует в анализируемом наборе данных) в множестве наборов СОИ сформулируем с использованием теории покрытия множества (*set covering*) [3].

Математическая постановка задачи

Комбинаторная постановка задачи о покрытии множества состоит в следующем.

Пусть дано множество D всех наборов СОИ, элементами которого являются пары <IP-адрес цели – IP-адрес источника>. Таким образом, каждый набор СОИ – это подмножество D , характеризующее IP-адресом источника. Элементами данного подмножества являются соответствующие IP-адреса цели.

Отношение инцидентности между наборами СОИ и IP-адресами цели для множества D задается бинарной матрицей (рис. 3)

$$\mathbf{D} = \{d_{ij}\}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n,$$

где $d_{ij} = 1(0)$, если соответствующий IP-адрес цели покрыт (не покрыт) данным набором СОИ, m – количество IP-адресов в мониторируемой ИТКС, n – число источников сканирования, т.е. количество наборов СОИ.

Столбец $\mathbf{d}^{(l)}$, $l = 1, \dots, n$, матрицы \mathbf{D} определяет состояние соответствующего набора СОИ.

			f	0	0	1	...
			r*	0	0	1	...
			r	0	0	0	...
			s	1	1	0	...
h	p	q					
0	0	0	0	0	0		
0	1	1	1	0	0		
1	1	2	1	1	0		
1	1	2	1	1	1		
0	1	1	0	1	1		
0	1	1	0	1	1		
0	0	0	0	0	1		
0	0	0	0	0	1		
...		
0	0	0	0	0	0		

Рис. 3. Матрица инцидентности, вектора состояния и рабочие столбцы

Обозначим $S \subset D$ – результирующее множество наборов СОИ, $R^* \subset D$ – множество наборов СОИ, помеченных на исключение, $R \subset D$ – множество исключенных наборов СОИ, $F \subset D$ – множество свободных элементов, $F = D \setminus (S \cup R)$. Каждому из этих множеств соответствует бинарный вектор состояния, элементы которого определяются входением наборов СОИ в данное множество. Например, результирующий вектор $\mathbf{s}(S)$, определяемый состоянием множества S , будет иметь вид

$$\mathbf{s}(S) = \{s_j\}, j = 1, \dots, n,$$

где n – число наборов СОИ, $s_j = 1(0)$, если соответствующий набор СОИ (столбец **d**) входит (не входит) в результирующее множество. Вектора $\mathbf{r}^*(R^*)$, $\mathbf{r}(R)$ и $\mathbf{f}(F)$ определяются аналогично.

Определим ряд операций над введенными выше множествами.

Пусть A – любое из вышеуказанных ранее множеств S , R^* , R или F , $\mathbf{a} = \{a_j\}, j = 1, \dots, n$ – его вектор состояния.

Операция $A+(i)$ – добавление в соответствующее множество элемента (набора СОИ) с индексом i . *$A-(i)$* – исключение из множества элемента с индексом i . Обе операции приводят к изменению вектора состояния множества, при котором элемент с индексом i инвертируется: $a_i = \sim a_i$.

$Rej(i)$ – «сложное исключение» элемента с индексом i , выполняется над множествами R и R^* : если $r^*_i = 0$, то $R^*+(i)$, иначе последовательно выполняются операции $R^*-(i)$ и $R+(i)$.

Определим также поэлементные унарные и бинарные операции над одномерными векторами.

E -нормирование вектора \mathbf{a} : $\mathbf{c} = E(\mathbf{a})$, где $c_i = 1(0)$, если $a_i \geq 1$ ($a_i \leq 0$).

Строгое E -нормирование вектора \mathbf{a} : $\mathbf{c} = \bar{E}(\mathbf{a})$, где $c_i = 1(0)$, если $a_i > 1$ ($a_i \leq 1$).

E -норма $V(\mathbf{a})$ вектора \mathbf{a} : количество его единичных элементов.

Инвертирование вектора: $\mathbf{c} = \sim \mathbf{a}$, где $c_i = \sim a_i$.

Логическое И: $\mathbf{c} = \mathbf{a} \& \mathbf{b}$, где $c_i = a_i \& b_i$.

Логическое Или: $\mathbf{c} = \mathbf{a} \parallel \mathbf{b}$, где $c_i = a_i \parallel b_i$.

Далее введем понятия, характеризующие состояние результирующего множества S .

Столбец пересечений $\mathbf{q}(S)$ – вектор, элементы которого равны числу покрытий соответствующего IP-адреса цели сканирования наборами СОИ, принадлежащими S ,

$$\mathbf{q}(S) = \mathbf{D} \times \mathbf{s}. \quad (1)$$

Столбец покрытия $\mathbf{p}(S)$ – бинарный вектор, элементы которого показывают, покрыт ли соответствующий IP-адрес цели сканирования результирующим множеством S ,

$$\mathbf{p}(S) = \mathbf{E}(\mathbf{q}). \quad (2)$$

Столбец перекрытия $\mathbf{h}(S)$ – бинарный вектор, элементы которого отражают наличие многократного покрытия соответствующего IP-адреса цели сканирования результирующим множеством S ,

$$\mathbf{h}(S) = \bar{\mathbf{E}}(\mathbf{q}). \quad (3)$$

Тогда коэффициент покрытия

$$X(S) = V(\mathbf{p}) / m. \quad (4)$$

Соответственно, коэффициент перекрытия

$$Y(S) = V(\mathbf{h}) / V(\mathbf{p}). \quad (5)$$

Для данного множества наборов СОИ (D) требуется сформировать результирующее множество S , такое, что

$$X(S) \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$Y(S) \rightarrow \min \quad (7)$$

при ограничениях

$$X(S) \geq X_0, \quad Y(S) \leq Y_0, \quad (8)$$

где X_0 – наименьший допустимый коэффициент покрытия; Y_0 – наибольший допустимый коэффициент перекрытия.

Кроме того, необходимо провести анализ сформированного множества на наличие профиля горизонтального сканирования, что является нахождением СС во множестве наборов СОИ.

Алгоритм решения задачи

Для решения задачи формирования результирующего множества предлагается алгоритм (рис. 4), опирающийся на технологию работы жадных алгоритмов *greedy* и *altgreedy* [1, 2, 3], относящихся к классу приближенных, которые строят допустимые решения за приемлемое время.

Каждая итерация разработанного алгоритма (рис. 4, блок 1), как и в случае *altgreedy*, включает в себя выполнение двух основных шагов. Первый из них реализуется блоком *Inc* и осуществляет включение подмножества множества D (набора СОИ) в результирующее множество S ; во втором блоке (*Del*) набор СОИ исключается из S . Весьма существенным является то, что набор СОИ может быть исключен из решения, а затем вновь выбран и включен в множество S на более поздней итерации.

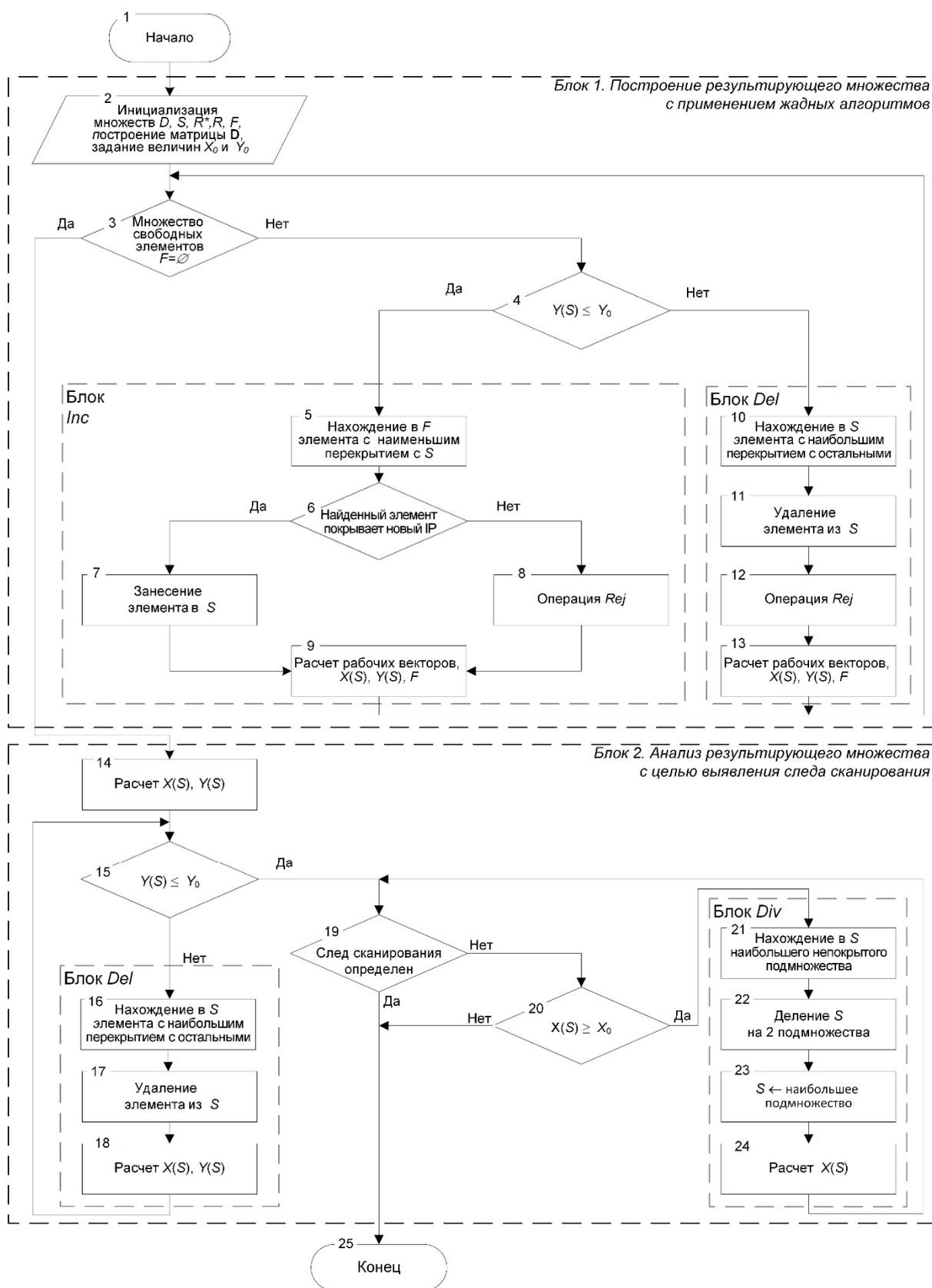


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения профиля скоординированного горизонтального сканирования

Блок *Inc* реализуется с использованием принципов алгоритма *greedy*, когда в результирующее множество S добавляются подмножества D , включающие элементы, не охваченные ранее. Но, в отличие от классического *greedy*, в предлагаемом алгоритме реализован выбор подмножеств с наименьшей степенью покрытия, которым соответствуют столбцы матрицы \mathbf{D} с наименьшей E -нормой.

Блок *Del* реализуется с использованием принципов алгоритма *altgreedy*, когда из результирующего множества S удаляются избыточные подмножества, содержащие наибольшее количество элементов, уже охваченных остальными подмножествами S . Таким образом, обеспечивается минимизация перекрытия в результирующем множестве.

Отметим, что в *altgreedy*-алгоритме решением задачи покрытия множества является *минимальное* количество подмножеств, покрывающих *все* множество с возможной минимизацией перекрытия между ними, т.е. результирующее множество \hat{S} , такое, что:

$$X(\hat{S}) = 1, \quad (9)$$

$$Y(\hat{S}) \rightarrow \min, \quad (10)$$

для которого вектор состояния \hat{s} отвечает условию

$$V(\hat{s}) = \min_{V_s} V(s). \quad (11)$$

Для решения задачи, поставленной в (6-8), алгоритм *altgreedy* адаптирован к ее структуре. Так, используется система эвристических правил «первый пригодный: выбирай *ближайший* набор СОИ, покрывающий *хотя бы один* новый IP-адрес цели (ищи среди первых столбцов матрицы \mathbf{D}); удаляй *наибольший* набор СОИ, содержащий наибольшее количество IP-адресов цели, уже покрытых другими выбранными наборами (ищи среди последних столбцов матрицы \mathbf{D}).

Замечание. Предлагаемая система эвристических правил не вписывается в схему *altgreedy*, так как увеличивается количество элементов в решении, при этом, разработанный алгоритм также можно отнести к типу жадных, так как на каждой итерации решение улучшается, приближаясь к оптимальному.

Кроме того, разработанный алгоритм, в отличие от *altgreedy*, является алгоритмом локального поиска (*local search*), так как в нем присутствуют меры допустимости результирующего множества: величины X_0 и Y_0 . С целью предупреждения возможного заикливания (многократного возврата к ранее просмотренному решению) используется метод поиска с запретами (*tabu search*). Для этого создается и хранится так называемый список исключений, в который помещается информация о последних решениях или последних изменениях решений (множества R^* и R), а переходы к этим решениям объявляются «запрещенными».

Замена жестких условий (9) и (11) алгоритма *altgreedy* мерами допустимости построения результирующего множества в решаемой задаче (6) и (8) приводит к тому, что в предложенном алгоритме значительно уменьшается количество переборов, что приводит к сокращению времени на построение решения.

Далее приведем описание разработанного алгоритма.

Входные параметры:

– множество D , представленное бинарной матрицей \mathbf{D} , столбцы которой отсортированы по возрастанию их E -нормы;

– наименьший допустимый коэффициент покрытия X_0 ;

– наибольший допустимый коэффициент перекрытия Y_0 .

Пошаговое описание алгоритма построения результирующего множества S представлено в таблице.

Алгоритм построения результирующего множества S (блок 1)

№ шага	Действия	Комментарии
1	2	3
Шаг 1.	Начало	
Шаг 2.	Инициализация массивов и переменных. $S = \emptyset; R^* = \emptyset, R = \emptyset, F = D.$	Положить рабочие множества пустыми, множество свободных элементов принять равным D .
	$S+(1).$	Включение во множество S элемента с наименьшим покрытием, расчет рабочих векторов, $X(S), Y(S).$
Шаг 3.	Если $V(\mathbf{f}) > 0$, то переход на следующий шаг, иначе – на блок 2.	Если множество свободных элементов не пусто, то перейти к следующему шагу, иначе завершение алгоритма построения результирующего множества.
Шаг 4.	Если $Y(S) \leq Y_0$, то переход на шаг 5, иначе – на шаг 10.	Если перекрытие в множестве S не превышает требуемого, то переход к блоку <i>Inc</i> , иначе к блоку <i>Del</i> .
Блок <i>Inc</i>		
Шаг 5.	Определение индекса k включения элемента: расчет $\mathbf{f} = \sim(\mathbf{s} \parallel \mathbf{r}), V(\mathbf{p} \& \mathbf{d}^{(k)}) = \min_{\forall i=1} V(\mathbf{p} \& \mathbf{d}^{(i)})$	Нахождение очередного свободного элемента с наименьшим перекрытием с S .
Шаг 6.	Если $V(\mathbf{p} \parallel \mathbf{d}^{(k)}) > V(\mathbf{p})$, то переход на следующий шаг, иначе – на шаг 8.	Если найденный элемент покрывает хоть один новый IP-адрес, включить его в S , иначе выполнить операцию <i>Rej</i> .
Шаг 7.	$S+(k).$	Включение в S найденного элемента.
Шаг 8.	Операция <i>Rej(k)</i> .	Не подошедший элемент либо помечается на удаление, либо удаляется из множества свободных элементов навсегда.
Шаг 9.	Расчет $\mathbf{p}(S), \mathbf{h}(S), \mathbf{q}(S), X(S)$ и $Y(S)$ и переход к шагу 3.	Расчет рабочих векторов, $X(S), Y(S).$
Блок <i>Del</i>		
Шаг 10.	Определение индекса k исключения элемента: $V(\mathbf{h}(S-(k))) = \min_{\forall i=1} V(\mathbf{h}(S-(i)))$	Нахождение в S элемента с наибольшим перекрытием с остальными.
Шаг 11.	$S-(k).$	Исключение из S найденного элемента.
Шаг 12.	Операция <i>Rej(k)</i> .	Не подошедший элемент либо помечается на удаление, либо удаляется из множества свободных элементов навсегда.
Шаг 13.	Расчет $\mathbf{p}(S), \mathbf{h}(S), \mathbf{q}(S), X(S)$ и $Y(S)$ и переход к шагу 3.	Расчет рабочих векторов, $X(S), Y(S).$

На основе данных, полученных с применением разработанного алгоритма, проводится анализ результирующего множества S (рис. 4, блок 2):

– на удовлетворение заданным требованиям (6 – 8) (шаги 14, 15): если перекрытие в S все еще больше требуемого, то продолжается удаление избыточных элементов (блок *Del*, шаги 16 – 18).

– на наличие скоординированного сканирования (шаг 19).

Нахождением СС является определение конкретной геометрии профиля, приводящей к отождествлению с соответствующей моделью сканирования, для чего применяются следующие подходы:

– использование набора данных Lincoln Labs [5], состоящего из комбинаций моделируемого сетевого трафика с известными сигнатурами атак, для тестирования систем обнаружения вторжений;

– обработка лог-файлов, содержащих статистические данные по результатам функционирования сетевых и узловых сенсоров систем обнаружения вторжений, а также дампов сетевого трафика, содержащих сведения о потенциальных неконтролируемых атаках и инцидентах ИБ;

– ручной анализ результатов обработки сетевого трафика.

Если профиль сканирования в результирующем множестве S не найден, а покрытие достаточно большое ($X(S) > X_0$) (шаг 20), то, принимая во внимание, что мониторируемое пространство IP-адресов, как правило, является непрерывным, множество S исследуется на наличие «разрыва» (наибольшего количества идущих подряд не покрытых IP-адресов цели сканирования), по которому происходит разделение множества S на два подмножества и за результирующее принимается наибольшее из них (блок *Div*) следующим образом.

Ищется такой $\mathbf{g}(S) = \{g_i\}$, $1 \leq i \leq m$ – любой непрерывный подвектор столбца покрытия $\mathbf{p}(S)$, где $g_i = 0$ и $V(\mathbf{g}) = \max_{\forall \mathbf{g}(S)} V(\mathbf{g})$ (шаг 21), и $\mathbf{p}(S)$ делится на два подстолбца (до «разрыва» и после), из которых выбирается столбец $\mathbf{p}'(S')$ с наибольшей *E-нормой* (шаг 21, 22). За результирующее принимается подмножество S' , покрытие которого соответствует столбцу $\mathbf{p}'(S')$ (шаги 23, 24). Полученное множество проверяется на наличие в нем профиля СС с помощью указанных выше методов. Если покрытие позволяет, деления S продолжаются до тех пор, пока не определен профиль СС.

Разработанный алгоритм применяется для выявления наличия скоординированного горизонтального сканирования во множестве наборов СОИ, при этом, предложенный подход с успехом может быть использован и для выявления стробирующего СС.

Заключение

Ключевыми параметрами для функционирования разработанного алгоритма определения СС являются: X – коэффициент покрытия, Y – коэффициент перекрытия, Z – коэффициент охвата. Параметры X и Y являются ключевыми переменными для процедуры построения результирующего множества S . Их значениями можно варьировать в широком диапазоне для обнару-

жения СС как в режиме эмуляции, так и симуляции. Параметр Z используется при анализе сформированного результирующего множества и должен быть достаточно высоким (близким к 0,95). С целью уменьшения нижнего уровня этого показателя требуется дальнейшая доработка алгоритма.

Перед включением наборов СОИ в множество D , являющееся входными данными для алгоритма построения результирующего множества, необходимо каждый СОИ проверить известными детекторами. В некоторых случаях СОИ является самостоятельным сканированием и требует самостоятельного решения. Такие СОИ не включаются во множество D .

При соблюдении данных рекомендаций, рассмотренный в статье алгоритм решает задачу обнаружения скоординированного горизонтального сканирования во множестве наборов СОИ при условии, что оно присутствует в соответствующем наборе анализируемых данных.

Список литературы

1. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. Introduction to Algorithms (гл. 16. Жадные алгоритмы) / под ред. И.В. Красикова. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.
2. Тараканов В.Е. Комбинаторные задачи и (0,1)-матрицы. М.: Наука, 1985. 192 с.
3. Tal Grossman and Avishai Wool. Computational experience with approximations algorithms for the set covering problem // European Journal of Operational Research, 101(1), 1997. P. 81-92.
4. Patel S.K., Sonker A. Rule-based network intrusion detection system for port scanning with efficient port scan detection rules using snort. // Int. J. Future Gener. Commun. Netw., 9(6), 2016. P. 339-350.
5. Смирнов Р.А. Организация в США военно-научной деятельности // Зарубежное военное обозрение, № 9, 2015. С. 32-36.
7. Овчаров В.А. Основы построения компьютерных сетей и разработки сетевых приложений: учеб. пособие / В.А. Овчаров. СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2014. 235 с.
8. Овчаров В.А., Калинин В.Н., Петренко С.А., Ломако А.Г. Расследование ИБ-инцидентов с использованием профилирования поведения динамических сетевых объектов // Защита информации. Инсайд, № 3(81), 2018.

Овчаров Владимир Александрович, д-р техн. наук, начальник отдела военного института (научно-исследовательского), kadet.ilia@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» МО РФ,

Ушаков Илья Алексеевич, канд. техн. наук, начальник лаборатории – старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского), kadet.ilia@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» МО РФ,

Трофимова Наталья Андреевна, научный сотрудник военного института (научно-исследовательского), hometroff@bk.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» МО РФ,

Лишин Николай Алексеевич, адъюнкт, kadet.ilia@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» МО РФ

THE TECHNOLOGY OF DETECTING HORIZONTAL COORDINATED SCANNING
OF MONITORED NETWORK INFRASTRUCTURE OBJECTS USING GREEDY
ALGORITHMS

V.A. Ovcharov, I.A. Ushakov, N.A. Trofimova, N.A. Lishin

The article describes the technology for detecting coordinated horizontal scanning of the monitored network infrastructure objects. The algorithm for constructing a resulting covering set based on a number of scans with several sources using the greedy algorithms principles is developed. Methods of further analysis of data obtained using this algorithm are proposed.

Key words: coordinated scanning, greedy algorithms, scanning profile.

Ovcharov Vladimir Alexandrovich, doctor of technical sciences, head of the department of the military institute (research), kadet.ilia@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Space Military Academy,

Ushakov Ilya Alekseevich, candidate of technical sciences, head of laboratory-senior research fellow of the Military Institute (Research), kadet.ilia@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Space Military Academy,

Trofimova Natalia Andreevna, research fellow, Military Institute (Research), hometroff@bk.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Space Military Academy,

Lishin Nikolay Alekseevich, postgraduate, kadet.ilia@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Space Military Academy

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Анцев А.В., Данг Х.Ч.

Прогнозирование периода стойкости режущего инструмента
на основе контроля вибрации в процессе фрезерования 3

Янов Е.С., Полев М.В., Анцев А.В.

Тенденции развития зубообработки червячными фрезами
за рубежом 12

Нгуен Т.З., Волгин В.М.

Анализ влияния переменности теплофизических свойств
обрабатываемого материала на форму и размеры лунки
при электроэрозионной обработке 18

Исрафилов И.Х., Галиакбаров А.Т.,

Габдрахманов А.Т., Самигуллин А.Д., Галиакбаров Р.Т.

Расчет параметров движущейся электрической дуги
в генераторе низкотемпературной плазмы 27

Хлудов С.Я., Борискина М.О., Хлудов А.С.

Дискретное представление профиля режущей кромки
многоступенчатой режущей пластины 33

Бреки А.Д., Гвоздев А.Е.,

Минаев И.В., Кутепов С.Н., Калинин А.А.

Математические модели характеристик процесса
фрикционного взаимодействия гетерофазных металлических
систем 39

Нгуен Т.З., Волгин В.М.

Моделирование формирования эрозионных лунок
при электроэрозионной микрообработке 54

Гадалов В.Н., Скрипкина Е.В., Беседин А.Г.,

Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Пантюхин О.В.

Диффузионные процессы и их физико-математическое
описание при сварке порошковых материалов 65

Хлудов С.Я., Борискина М.О., Хлудов А.С., Чечуга А.О.

Исследования работоспособности многоступенчатых режущих
пластин с дискретным исполнением режущей кромки 77

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Белицкий А.А., Шклярский Я.Э.

Оценка добавочных потерь мощности в электрических сетях
с нелинейной и несимметричной нагрузкой 86

Михайлов А.А., Прасько А.Д., Троценко И.В.

Оценка частоты и фазы синусоидальных электрических колебаний ... 94

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Прейс В.В., Морозов В.Б., Морозова Т.Г.

Выбор простой регрессионной модели диффузии сахаров
для оптимизации процесса резания 99

Бреки А.Д., Семенов С.А.,

Стариков Н.Е., Гвоздев А.Е., Лаврушин А.В.

Влияние микроскопических грибов *Aspergillus Niger*
на триботехнические свойства пластичного смазочного
материала марки «ЛИТА» 108

Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Гвоздев А.Е.,

Чуканов А.Н., Кутепов С.Н., Пантюхин О.В.

Исследование влияния легирования на механические
и коррозионные свойства арматурного проката 117

Маликов А.А., Сидоркин А.В., Рахметов С.Л.

К вопросу определения минимального радиуса кривизны арки
зуба цилиндрического колеса с учетом технологических
ограничений, возникающих при его зубообработке 131

Чечулин К.М., Бреки А.Д., Молоков И.Е.,

Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Пантюхин О.В.

Влияние изменения пригодности моторного масла М-8ДМ
в двигателе внутреннего сгорания Д-245.7ЕЗ автомобиля
ГАЗ-3309 на циклы его поставки в границах технического
обеспечения 137

Сорокин П.А., Гринчар Н.Н.

Планирование снабжения запасными частями машин
с объемным гидроприводом с учетом факторов риска 151

Скобельцын С.А., Пешков Н.Ю.
Дифракция звука в полупространстве на конечном упругом
цилиндре с неоднородным покрытием 158

*Аунг Чжо Тху, А.В. Бабайцев,
Егорова О.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н.*
Исследование влияния одностороннего тонкого полимерного
покрытия на механические свойства стальных пластин
в испытаниях на изгиб 175

Скобельцын С.А., Пешков Н.Ю.
Рассеяние звука неоднородным упругим эллиптическим цилиндром
в акустическом полупространстве 183

Маликов А.А., Сидоркин А.В.
Особенности технологического обеспечения процесса
шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес
в лабораторных условиях 201

Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В.
Определение допустимых диапазонов длины шага четырехногого
внутритрубного робота 206

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

Насонов Д.А., Леонтьев М.Ю., Раевский В.А., Смоленик А.Е.
Моделирование и расчет амплитудно-частотных характеристик
корпуса двухступенчатого планетарного редуктора 218

Крюков В.А., Савельева Л.В.
Характеристики асинфазного движения в двухпоточной
цилиндрической зубчатой передаче 224

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Макаров А.М., Мушкин О.В., Дикарев П.В., Лапиков М.А.
Использование машинного зрения при исследовании процесса
автоматического манипулирования гибким контейнером 238

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Фадин И.А., Янов С.В.
Модель функционирования орбитальной системы мониторинга
космической обстановки 248

Селихов В.А.
Построение карты глубины с использованием глубокой сверточной нейронной сети 262

Бибиков С.В., Певнева А.Г., Халиков Э.М.
Методика оценки качественных показателей алгоритма верификации биометрической системы доступа 277

Фадин И.А., Горбулин В.И., Матвеев А.А.
Модель орбитальной системы мониторинга космической обстановки, построенной на круговых орбитах равного радиуса 290

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ

Прейс В.В., Чурочкин А.В.
Параметрический синтез вертикального бункерного загрузочного устройства для плоских асимметричных предметов обработки на заданную производительность 305

Шубин А.А., Смолоник А.Е., Дедов Г.Ю.
Модернизация железнодорожной машины для нарезки кюветов СЗП-600 315

ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ

Селифонтов Д.О.
Материалы, применяемые для производства современных образцов СПВ, и способы их защиты 322

Гусеница Я.Н., Малахов А.В., Новиков А.Н.
Научно-методический подход к комплексному оцениванию эффективности метрологического обеспечения 330

Куприков М.Ю., Рабинский Л.Н.
Структурно-параметрический анализ и синтез облика самолета вертикального взлета и посадки 343

Искоркин Д.В.
Метод учёта наземных разрывов при обработке результатов дистанционных стрельб по определению характеристик рассеивания 356

Пирогов С.Ю., Карчин А.Ю., Белянин Д.Г., Аневалов А.В.
Методика определения аэродинамических характеристик элементов отделяемых частей ракет-носителей 368

<i>Алексеенков А.С., Беклемищев Ф.С., Лалабеков В.И., Правидло М.Н., Самсонович С.Л., Тихонов К.М.</i> Построение математической модели источника энергии и исполнительного механизма адаптивного авиационного катапультного устройства	376
<i>Малюгин А.В., Пилипенко Л.В., Пирухин В.А.</i> Модель оценивания эффективности применения измерительного комплекса	384
<i>Перфильев А.С., Султанов А.Э., Герасименко С.Ю.</i> Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты-носителя, снижающих надежность агрегатов двигательных установок	391
<i>Алексеенков А.С., Беклемищев Ф.С., Лалабеков В.И., Правидло М.Н., Самсонович С.Л., Тихонов К.М.</i> Результаты математического моделирования работы источника энергии и исполнительного механизма адаптивного авиационного катапультного устройства	400
<i>Агиевич С.Н., Луценко С.А.</i> Применение ретранслированных помех в целях воздействия на спутниковые системы радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами	413
<i>Аношкин А.В., Азаров А.И.</i> Потенциальная помехоустойчивость частотно – модулированных сигналов с непрерывной фазой	420
<i>Лютин В.И., Ананьев А.В., Гончаренко В.И.</i> Различение и синхронизация псевдослучайных сигналов с внутриимпульсной фазовой манипуляцией на фоне белого шума и узкополосной аддитивной помехи	428
<i>Ананьев А.В., Гончаренко В.И., Лютин В.И.</i> Разработка цифровых устройств анализа и коррекции спектральной структуры сигналов для беспилотных систем	446
<i>Овчаров В.А., Ушаков И.А., Трофимова Н.А., Лишин Н.А.</i> Технология выявления скоординированного горизонтального сканирования объектов мониторируемой сетевой инфраструктуры с использованием жадных алгоритмов	457

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 7

Редактор О.И. Борискин

Компьютерная правка и верстка – К.А. Александрович, Б.С. Яковлев

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97

Подписано в печать 23.07.18. Дата выхода в свет 27.07.18

Формат бумаги 70×100 1/8. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 77,19

Тираж 500 экз. Заказ 111

Цена свободная

Адрес редакции и издателя:

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95