

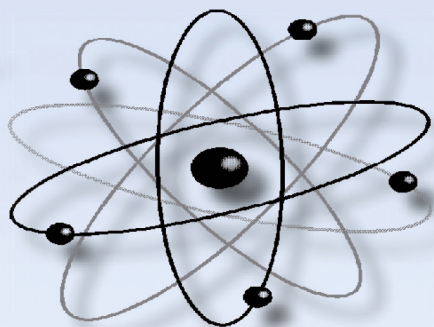
Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ III (83)

2025

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.

Отделы журнала «Управление», «Вычислительная техника и информатика», «Машиностроение», «Культурология и искусствоведение» включены в перечень изданий ВАК РФ.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Učenyje zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КНАГУ», находящейся на сайте <https://uzknastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27
Телефон для справок: +7 (4217) 528-548

Адрес редакции: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Комсомольская, д. 50, ауд. 508

Индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.

Цена свободная.

© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КНАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:	Алексей Иванович Евстигнеев , доктор технических наук, профессор. E-mail: diss@knastu.ru
Заместитель главного редактора журнала:	Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:	Евгения Павловна Иванкова , кандидат технических наук, доцент. E-mail: peit@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцента. E-mail: lmk@knastu.ru
Литературный редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.ru
Технический редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.ru
Перевод на английский язык:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Дизайн и верстка:	Оксана Вадимовна Приходченко , кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru
Менеджер информационных ресурсов:	Татьяна Владимировна Степанова . E-mail: osnid@knastu.ru
Администратор сайта:	Оксана Вадимовна Приходченко , кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru

Серия: «Науки о природе и технике»

Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»	Евгения Павловна Иванкова , кандидат технических наук, доцент. E-mail: peit@knastu.ru
---	---

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (2.5.13 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов)	Сергей Иванович Феоктистов , доктор технических наук, профессор. E-mail: ssf@knastu.ru Сергей Борисович Марьин , доктор технических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru
2. Энергетика (2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы)	Константин Константинович Ким , доктор технических наук, профессор. E-mail: kimkk@inbox.ru Александр Владимирович Сериков , доктор технических наук, профессор. E-mail: em@knastu.ru Сергей Николаевич Иванов , доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
3. Управление (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	Вячеслав Алексеевич Соловьев , доктор технических наук, профессор. E-mail: kepapu@knastu.ru Андрей Юрьевич Торгашов , доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)	Валерий Иванович Одионов , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: osnid@knastu.ru Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru
5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)	Борис Яковлевич Мокрицкий , доктор технических наук, профессор. E-mail: boris@knastu.ru Владимир Сергеевич Щетинин , доктор технических наук, доцент. E-mail: schetynin@mail.ru
6. Материаловедение и химические технологии (2.6.17 - Материаловедение)	Эдуард Анатольевич Дмитриев , доктор технических наук, профессор, E-mail: rector@knastu.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор, E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (1.1.8 - Механика деформируемого твердого тела)	Анатолий Александрович Буренин , доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru Константин Сергеевич Бормотин , доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор, E-mail: bashkov_ov@mail.ru Олег Евгеньевич Сысоев , доктор технических наук, профессор, E-mail: sia@knastu.ru

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
---	--

Отделы:

1. Культурология и искусствоведение (5.10.1 - Теория и история культуры, искусства)	Яна Станиславовна Крыжановская , доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowskaia.yana2012@yandex.ru Евгения Валерьевна Савелова , доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. Виктория Юрьевна Прокофьева , доктор филологических наук, профессор. Илья Игоревич Докучаев , доктор философских наук, профессор.
2. Психология и педагогика (5.8.1 - Общая педагогика, история педагогики и образования)	Татьяна Евгеньевна Наливайко , доктор педагогических наук, профессор. E-mail: tenal@knastu.ru
3. История (5.6.1 - Отечественная история)	Жанна Валерьевна Петрунина , доктор исторических наук, профессор. E-mail: petrunina71@bk.ru, history@knastu.ru

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

Содержание

УПРАВЛЕНИЕ

Черный С. П., Емельянов К. А., Лямин М. А., Облогин Д. Ю.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	4
---	---

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Андрианов И. К., Фролов Д. О.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ТЕРМОНАГРУЖЕННОЙ ОБЛАСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	11
--	----

Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ РЕКИ АМУР	16
--	----

Тукмаков Д. А.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МОНОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ	24
--	----

Ермаков С. Г., Забродин А. В., Костин М. А.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА БЛУМА ДЛЯ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	32
---	----

Носков С. И., Беляев С. В.

АНТИРОБАСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЛАСТЕРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ	41
---	----

Дмитриева Т. Л., Ботхоев А. Е., Фролов Д. О.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИНСТРУМЕНТАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ MATHCAD	46
--	----

Иванкова Е. П., Колесник М. Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В ПАКЕТЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	54
--	----

Фролов А. В., Швец А. Н., Мусихин Ю. Ф.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯТОРА ДЛЯ ДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ	63
---	----

Чернышов А. Д., Горайнов В. В.

НАПРЯЖЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЕ, ЗАКРЕПЛЁННОЙ В НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ	68
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Сысоев О. Е., Марьин С. Б., Сысоев Е. О.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ	72
---	----

Щетинин В. С., Космынин А. А.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ОТ ДОЛИ ПОРИСТОСТИ ИХ ЧАСТИЧНО ПОРИСТЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ	76
---	----

Ри Э. Х., Приходько А. А., Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Чешев С. С.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ МЕТОДОВ	79
--	----

Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Щекин А. В., Борец М. И., Ермаков М. А.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КАЧЕСТВО ОТЛИВОК	93
--	----

Мокрицкий Б. Я., Космынин А. В., Скрипилёв А. А., Сысоев О. Е.

ОБЛАСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СБОРНЫХ ФРЕЗ РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ ВЫСОКОТВЁРДЫЙ СЛОЙ	107
--	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Белова И. В.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ГИЛЬЗЫ ГИДРОЦИЛИНДРА	112
--	-----

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л., Канашин И. В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ О ВДАВЛИВАНИИ КЛИНА В ВЫПУКЛУЮ ЗАГОТОВКУ	117
--	-----

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА ИГОРЕВИЧА ХРОМОВА	127
---	-----

УПРАВЛЕНИЕ
CONTROL

Черный С. П., Емельянов К. А., Лямин М. А., Облогин Д. Ю.
S. P. Cherniy, K. A. Emelianov, M. A. Lyamin, D. Yu. Oblogin

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

**SIMULATION OF A MULTI-STAGE FUZZY CONTROLLER FOR CONTROLLING
A MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE SYSTEM**

Черный Сергей Петрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keapu@knastu.ru.

Sergei P. Cherniy – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keapu@knastu.ru.

Емельянов Кирилл Андреевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Kirill A. Emelianov – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Лямин Михаил Андреевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: lyamin.ma@email.knastu.ru.

Mikhail A. Lyamin – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: lyamin.ma@email.knastu.ru.

Облогин Данил Юрьевич – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Danil Yu. Oblogin – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. В представленной работе рассмотрена возможность построения интеллектуальной системы управления многодвигательной системой электроприводов, основанной на теории нечётких множеств. С учётом дополнительного критерия регулирования, накладываемого на систему управления, показана необходимость её построения на основе многокаскадной методологии, которая включает в себя принципы иерархичности и модульности. В материалах статьи предложена модель многокаскадного нечёткого логического регулятора содержащего нечёткий модуль во внешнем каскаде и три простейших нечётких элемента во вложенном. Анализ многокаскадной нечёткой системы управления многодвигательным объектом проведён с учётом различных воздействий недетерминированного характера в каналах регулирования и возмущения.

Summary. In this paper, the possibility of constructing an intelligent control system for a multi-motor electric drive system based on the theory of fuzzy sets is considered. Taking into account the additional criterion of regulation imposed on the management system, the necessity of its construction based on a multi-stage methodology, which includes the principles of hierarchy and modularity, is shown. The materials of the article propose a model of a multi-stage fuzzy logic controller containing a fuzzy module in an external cascade and three simplest fuzzy elements in a nested one. The analysis of a multi-stage fuzzy control system for a multi-motor object was carried out taking into account various non-deterministic effects in the control channels and disturbances.

Ключевые слова: многодвигательная система, система управления электроприводом, многокаскадный нечёткий логический регулятор.

Key words: multi-motor system, electric drive control system, multi-stage fuzzy logic controller.

Исследования проводились в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024-2026 годы по теме «Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники» и при поддержке гранта Умник № 19419ГУ/2024 от 30.05.2024 «Разработка робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов».

УДК 681.5.01:658.5

Введение. В связи с тем, что требования к процессам управления в различных высокотехнологичных отраслях, таких как робототехника, авиастроение и электроэнергетика, постоянно растут, разработка новых систем управления, качественно улучшающие существующие процессы, приобретает критическое значение. Для обеспечения высоких показателей качества управления необходимы точная математическая модель объекта управления и чётко сформулированная система ограничений работы этого объекта. С учётом изменяющихся подходов к формализации объектов регулирования, а именно к повышению требований к точности, качеству математического описания, сокращению ограничивающих факторов, наличию целого ряда критериев оптимизации, необходимо изменить подходы к синтезу нечётких систем. Возможными вариантами реализации такого рода требований к системе могут являться как структурные изменения (внедрение вложенности в регуляторы), так и параметрические модификации (моделирование функций принадлежности пространственной формы) [1–4]. Примером структурных изменений является синтез регуляторов, структурно разделяемых на несколько уровней или каскадов. Внедрение многокаскадности в нечёткий логический регулятор позволит существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, расширить его возможности адаптации к изменениям условий работы системы (как внешним, в виде разнородных возмущающих воздействий, так и внутренним при изменении свойств объекта управления), облегчить процессы настройки и перенастройки, а также уменьшить информационную избыточность и алгоритмическую сложность регуляторов при реализации в виде единого модуля.

На основе вышеописанного использование многокаскадных нечётких регуляторов для управления сложными технологическими объектами (к примеру, многодвигательными аппаратами) позволит реализовать процедуры управления с учётом различных дополнительных критериев.

Моделирование интеллектуальной системы. В качестве объекта регулирования выступает многодвигательная система, в состав которой входят два электропривода постоянного тока, примерно сопоставимые по развиваемым моменту и скорости вращения вала [6–9]. При этом один из приводов является основным, а второй подключается в систему для компенсации возникающих возмущающих воздействий. Валы двигателей объединены в единую систему через редукторы. Однако в данной конкретной работе предметом исследования является формирование интеллектуальной системой общего момента электродвигателей с учётом возникающих ситуаций, поэтому подробное описание механических взаимосвязей электродвигателей рассматриваться не будет (см. рис. 1).

В представленной интеллектуальной системе управления, основанной на многокаскадном нечётком логическом регуляторе, заложены следующие функции:

1. регулирование основного электропривода в зависимости от заданного сигнала, поступающего на основной регулятор;
2. подключение вспомогательного электропривода в моменты возникновения просадок скорости вращения вала основного привода;
3. контроль выходной величины вспомогательного электропривода с целью компенсации возникшей просадки и поддержания выходного сигнала всей системы на необходимом уровне [10–12].

При реализации необходимых процедур регулирования в многодвигательной системе для принятия решений интеллектуальной системе необходим следующий набор входных данных:

- ошибка системы по скорости вращения основного электропривода;

- интеграл от сигнала ошибки основного электропривода;
- преобразованный сигнал ошибки основного электропривода.

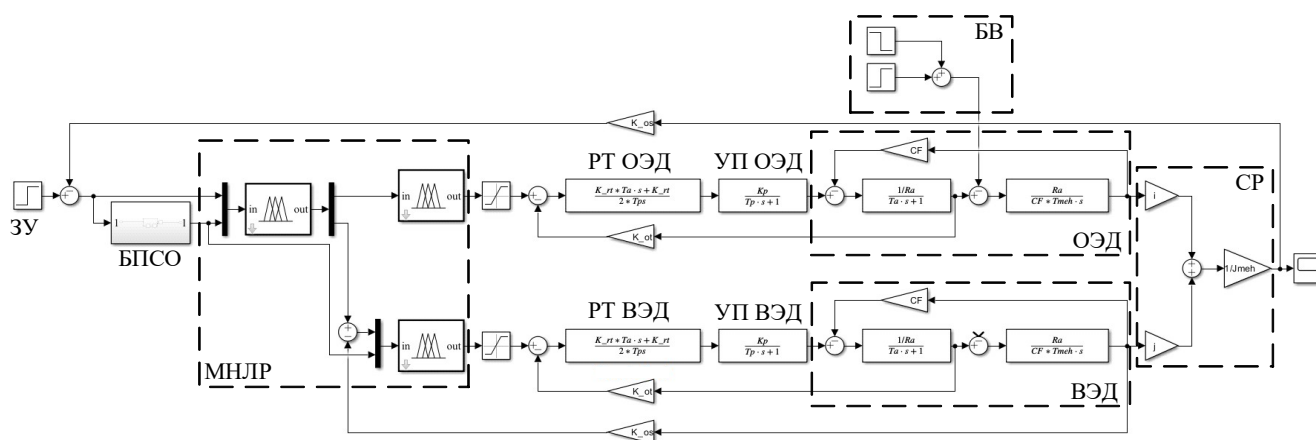


Рис. 1. Имитационная модель интеллектуальной системы управления многодвигательным объектом: ЗУ – задающее устройство; БПСО – блок преобразования сигнала ошибки; МНЛР – многокаскадный нечёткий логический регулятор; РТ ОЭД – регулятор тока основного электродвигателя; РТ ВЭД – регулятор тока вспомогательного электродвигателя; УП ОЭД – управляемый преобразователь основного электродвигателя; УП ВЭД – управляемый преобразователь вспомогательного электродвигателя; ОЭД – основной электродвигатель; ВЭД – вспомогательный электродвигатель; БВ – блок возмущений; СР – система редукторов

Преобразование сигнала основного электропривода, формализующего ошибку по скорости, проводится для определения уровня просадки скорости вращения вала. Структурная схема блока, который реализует преобразование сигнала ошибки, приведена на рис. 2.

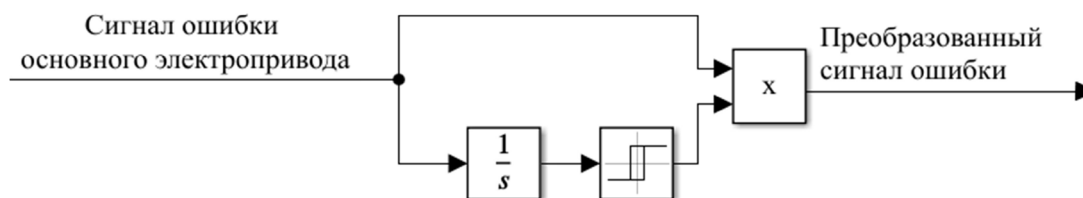


Рис. 2. Структурная схема блока преобразования сигнала ошибки

Преобразованный сигнал ошибки представляет собой разницу между номинальным значением скорости вращения вала и установившимся значением скорости после возникновения возмущающего воздействия.

С учётом вышеперечисленных требований формируется структура многокаскадного нечёткого логического регулятора, показанного на рис. 3. Нечёткий регулятор внешнего каскада Main-Fuzz, который в системе является управляющим и анализирующим устройством, содержит две лингвистических переменных входного канала и две лингвистических переменных выходного канала регулятора [13; 14].

Представленный на рис. 3 многокаскадный нечёткий логический регулятор функционирует на основе алгоритма нечёткого вывода Мамдани. Целевыми задачами его функционирования являются интеллектуальная оценка входных сигналов и выбор управляющего воздействия на вложенный каскад регуляторов многокаскадной нечёткой системы управления в соответствии с текущим состоянием системы [15; 16].

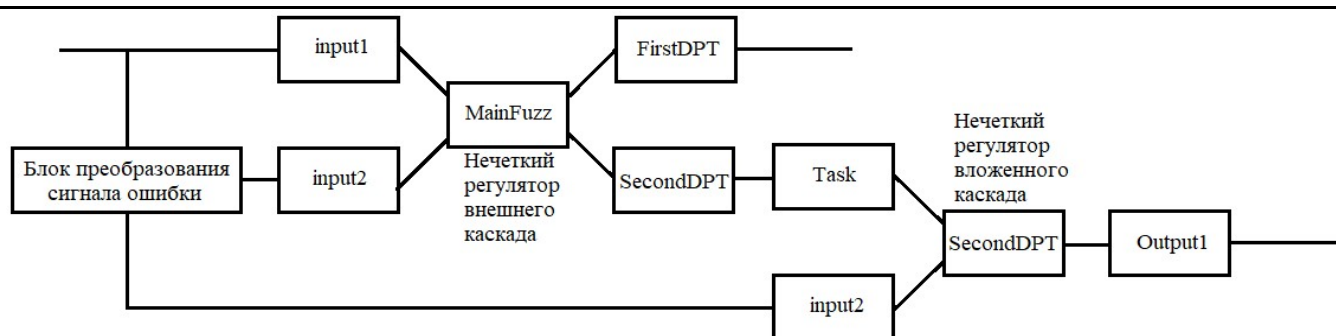


Рис. 3. Функциональная схема многокаскадного нечёткого логического регулятора

Структурный синтез многокаскадного нечёткого регулятора. За формализацию понятия входного сигнала нечёткого логического регулятора отвечают лингвистические переменные *input1* и *input2*. Терм-множество лингвистической переменной *input1* представлено набором из пяти нечётких переменных с треугольными функциями принадлежности. Лингвистическая переменная *input2* формализуется аналогичным набором параметров, но в своей заданной области определения.

Формирование процедур управления основным электроприводом обеспечивает лингвистическая переменная *FirstDpt*, формализующая понятия выходного сигнала управления по скорости пятью термами в базовом терм-мноестве и функциями принадлежности треугольного вида. Второй выход нечёткого регулятора внешнего каскада описывает лингвистическая переменная *SecondDpt*, которая формализует понятие управления включением вспомогательного электропривода с аналогичным набором нечётких переменных.

Нечёткая продукционная база знаний НЛР формируется с применением общепринятых методик и будет состоять из шести продукционных правил.

Необходимо отметить, что в списке правил обязательно наличие специализированного правила, определяющего условие, при котором осуществляется подключение вспомогательного электропривода.

Для корректной работы многокаскадного регулятора в продукционную базу правил необходимо внести правила, формализующие функционал корректировки в структуре элементов, связанных со вспомогательным электроприводом, реализация процедуры управления которым возлагается на нечёткий модуль вложенного каскада. Основным функциональным назначением нечёткого логического регулятора *SecondDPT* (см. рис. 3) является формирование сигнала управления в канале регулирования скорости вспомогательного электропривода. Вход нечёткого логического регулятора представлен лингвистической переменной *Task*, которая формализует понятие первого входного сигнала стандартным терм-множеством из пяти нечётких переменных с аппроксимированными функциями принадлежности.

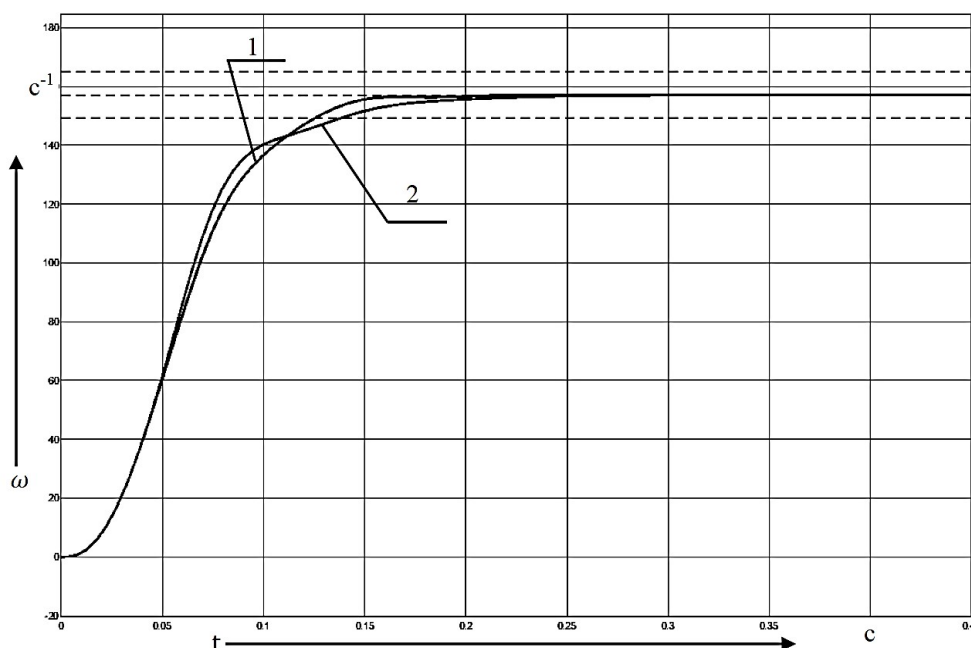
Результатом дефаззификации лингвистической переменной *Output1* на диапазоне регулирования пятью термами и набором равномерно распределённых функций принадлежности аппроксимированного вида является формирование сложного управляющего сигнала для вспомогательного электропривода многодвигательной системы.

База знаний нечёткого регулятора *SecondDPT*, формирующего вложенный каскад интеллектуальной системы управления многодвигательным электроприводом, будет иметь следующий набор:

1. Если «*Task*» есть *mf1* и «*input2*» есть *mf1*, то «*Output1*» есть *mf1*;
2. Если «*Task*» есть *mf2* и «*input2*» есть *mf2*, то «*Output1*» есть *mf2*;
3. Если «*Task*» есть *mf3* и «*input2*» есть *mf3*, то «*Output1*» есть *mf3*;
4. Если «*Task*» есть *mf4* и «*input2*» есть *mf4*, то «*Output1*» есть *mf4*;
5. Если «*Task*» есть *mf5* и «*input2*» есть *mf5*, то «*Output1*» есть *mf5*.

Одной из целей при построении многокаскадной системы управления также является улучшение показателей регулирования классической системы, таких как уменьшение времени регулирования и снижение величины перерегулирования.

Далее на рис. 4 представлены графики переходных характеристик многодвигательной системы, которая регулируется многокаскадным нечётким регулятором. Также для проведения сравнительного анализа на рис. 4 и 5 приведены графики переходных процессов аналогичной многодвигательной системы, но с классическим регулятором скорости, настроенным на модульный оптимум.



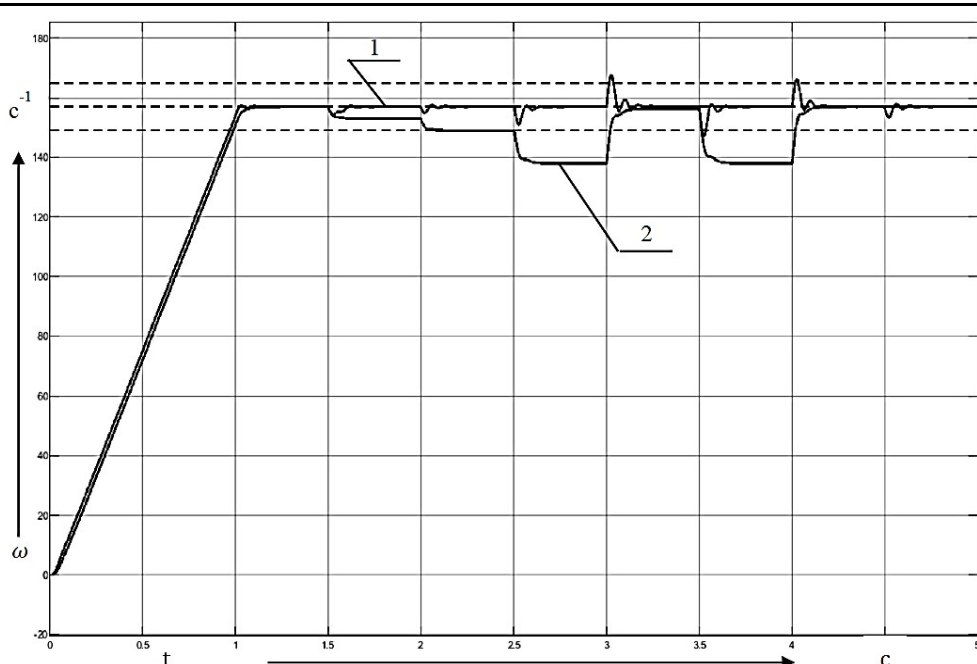
1 – система с нечётким многокаскадным регулятором; 2 – система с классическим регулятором
Рис. 4. Переходная характеристика по скорости в многодвигательной системе

На рис. 4 можно видеть улучшение основных показателей качества регулирования, например повышение быстродействия системы при использовании многокаскадного нечёткого логического регулятора в качестве управляющего устройства.

Проведём анализ системы при подаче на неё комплексного возмущающего воздействия, состоящего из ряда последовательных сигналов дискретного характера (см. рис. 5).

Характеристики, представленные на рис. 5, иллюстрируют отсутствие способности классической системы к стабилизации скорости и поддержанию её необходимой величины при подаче на многодвигательный электропривод комплексного возмущающего воздействия. В свою очередь, разработанная многодвигательная система способна обеспечить компенсацию ряда импульсных внешних негативных воздействий и поддерживать выходной сигнал системы на заданном уровне.

Заключение. Была разработана интеллектуальная система управления многодвигательным электроприводом, способная поддерживать необходимый выходной сигнал, не превышая номинальных параметров её элементов. Предложенная многокаскадная система управления элементами многодвигательного электропривода позволяет не только синхронизировать работу основного и вспомогательного электропривода, но и реализовывать процедуры управления двигателями независимо за счёт вложенности нечётких модулей, а также осуществлять компенсацию различных недетерминированных внешних возмущений.



1 – система с нечётким многокаскадным регулятором; 2 – система с классическим регулятором
 Рис. 5. Переходная характеристика многодвигательной системы при наличии
 комплексного возмущающего воздействия

В развитии методологии нечёткого многокаскадного управления представлен структурный синтез интеллектуального регулятора, который реализует комплексную процедуру регулирования во внешнем каскаде. Такая процедура управления совмещает в себе реализацию закона управления для основного электропривода многодвигательной системы с подключением вложенного каскада. На единственный нечёткий модуль вложенного каскада в структуре развитой интеллектуальной системы управления возложена функция формирования управляющего воздействия на дополнительный двигатель в составе объекта регулирования. Кроме того, необходимо отметить, что регулирование основным электроприводом в многодвигательной системе может быть реализовано также и посредством включения во вложенный каскад соответствующего нечёткого модуля. В перспективе предложенного структурного решения можно отметить, что в качестве вложенных модулей могут выступать и регуляторы, настроенные с использованием традиционных классических принципов, а также смешанное гетерогенное представление схемы такой интеллектуальной системы управления.

Предложенная методика многокаскадного нечёткого управления позволит реализовывать сложные процедуры регулирования для целого ряда робототехнических транспортных комплексов, имеющих в своей основе набор электроприводов различных габаритов в условиях действия совокупности критериев, таких как точность позиционирования, повышение энергоэффективности, оптимизация перемещения по траекториям сложной конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный, С. П. Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора для стабилизации модульного тралового механизма / С. П. Черный, В. Н. Хрульков, Б. Я. Мокрицкий // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 11. – С. 126-132.
2. Черный, С. П. Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора для управления многосоставным траловым механизмом на основе оператора сложения / С. П. Черный, В. Н. Хрульков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 53-60.



3. Лямин, М. А. Система совместного управления электроприводами мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов / М. А. Лямин, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 66-73.
4. Лямин, М. А. Система согласованного управления положением взаимосвязанных электроприводов роботизированной транспортной платформы / М. А. Лямин, С. П. Черный // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4 (1). – С. 331-340.
5. Стельмашук, С. В. Система подчинённого управления скалярным частотно-регулируемым многодвигательным электроприводом с независимым соединением асинхронных двигателей / С. В. Стельмашук, И. Ю. Лакеев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 57-65.
6. Стельмашук, С. В. Подчинённое управление многодвигательным электроприводом с последовательным соединением двигателей постоянного тока с независимым возбуждением / С. В. Стельмашук, А. А. Гурулев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 403-411.
7. Стельмашук, С. В. Разработка системы управления электропривода насоса для гидравлической сети с учётом инерционной составляющей давления / С. В. Стельмашук, С. Д. Демин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III (59). – С. 78-84.
8. Дубовик, М. Е. Исследование электропривода переменного тока с управлением по цепи ротора / М. Е. Дубовик, В. А. Соловьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 390-399.
9. Лисин, С. Л. Повышение быстродействия следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем / С. Л. Лисин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2012. – № 4 (36). – С. 173-181.
10. Стариков, А. В. Следящий электропривод с асинхронным исполнительным двигателем / А. В. Стариков, Д. Н. Джабасова // Известия высших учебных заведений «Электромеханика». – 2014. – № 5. – С. 72-75.
11. Михайлов, О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов / О. П. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
12. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учеб. / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академик», 2005. – 304 с.
13. Максимова, Н. А. Применение технологии многокаскадного нечёткого управления для электроприводов постоянного тока / Н. А. Максимова, С. П. Черный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – № 4 (25). – С. 50-54.
14. Черный, С. П. Моделирование интеллектуальной системы управления с многокаскадным нечётким ПИД-регулятором / С. П. Черный, Е. Н. Землянская, А. С. Филатова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – Т. IV-1 (24). – С. 15-21.
15. Khrulkov, V. Method of Implementing a Fuzzy Logic Controller by Hardware / V. Khrulkov, S. Vasilchenko, S. Cherny // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06-09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2020. – P. 9271539. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271539.
16. Cherniy, S. P. Modeling of an Advanced Fuzzy Logic Controller with Elementary Links in the Internal Cascade / S. P. Cherniy, V. I. Susdorf, A. V. Buzikayeva // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06-09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2020. – P. 9271136. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271136.

Андрианов И. К., Фролов Д. О.
I. K. Andrianov, D. O. Frolov

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ТЕРМОНАГРУЖЕННОЙ ОБЛАСТИ
НА ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

**METHOD FOR DETERMINING THE MOST THERMALLY LOADED AREA
ON THE SURFACE OF A GAS TURBINE ENGINE BLADE USING A NEURAL NETWORK**

Андрианов Иван Константинович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Ivan K. Andrianov – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Аннотация. В данной статье предложен метод для определения наиболее термонагруженной зоны на поверхности лопатки газотурбинного двигателя, омываемой высокотемпературной газовой средой, с применением нейронных сетей. Задача точного определения температурных пиков является ключевой для повышения долговечности работы лопаток газотурбинных двигателей, а также повышения эффективности работы систем охлаждения. В статье приводятся подходы к моделированию температурных распределений с использованием численных решений уравнений теплопроводности. Нейронная сеть, обученная на стандартизированных данных, показала высокую точность, сравнимую с результатами традиционных аналитических и численных методов. Анализ ошибок модели, а также исследование влияния гиперпараметров и структуры сети на точность предсказаний показали положительные результаты. Работы подтверждают потенциал применения методов машинного обучения для прогнозирования тепловых процессов в условиях высоких температур, характерных для эксплуатации турбин. В статье также рассматриваются практическое применение предложенной методики и перспективы её дальнейшего улучшения.

Summary. This article proposes a method for determining the most thermally loaded zone on the surface of a gas turbine engine blade washed by a high-temperature gas environment using neural networks. The task of accurately determining temperature peaks is key to increasing the durability of gas turbine engine blades, as well as increasing the efficiency of cooling systems. The article presents approaches to modeling temperature distributions using numerical solutions of heat conduction equations. A neural network trained on standardized data showed high accuracy comparable to the results of traditional analytical and numerical methods. Analyze error patterns and explore all hyperparameters and network structure to predict positive results. The work confirms the potential of using machine learning methods to predict thermal processes under high-temperature conditions typical for turbine operation. The article also discusses practical applications of the proposed methodology and prospects for its further improvement.

Ключевые слова: турбинная лопатка, тепловое нагружение, нейронные сети, прогнозирование температурного поля.

Key words: turbine blade, thermal loading, neural networks, temperature field prediction.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10114 «Разработка системы диагностирования повреждений турбинных лопаток и способа оптимизации теплоотвода в условиях термической усталости» (<https://rscf.ru/project/22-79-10114/>).



УДК 517.95

Введение. Развитие современного турбомашиностроения связано с разработкой методов диагностирования усталостных трещин и снижения вероятности разрушения турбинных лопаток в процессе их развития. Сегодня проведён ряд исследований для обнаружения трещин в турбинных лопатках в нестационарных условиях [1–3]. Одним из подходов для исключения развития трещин в лопатках, подвергаемых тепловому и силовому воздействиям, является применение оптимизированных систем внутреннего охлаждения. Однако малоисследованным остаётся вопрос оптимизации таких систем. Актуальность данного исследования обусловлена тем, что точное определение наиболее нагруженных участков лопатки позволит оптимизировать работу системы охлаждения за счёт перераспределения подачи охлаждающей газовой среды, повысив эффективность теплоотвода в наиболее термонагруженных участках. Реализация неравномерного охлаждения позволит исключить нецелесообразный теплоотвод в менее нагруженных зонах.

Прогнозирование температурного распределения на поверхности лопаток турбин имеет ключевое значение для их долговечности и надёжности. Лопатки газотурбинного двигателя эксплуатируются при экстремальных температурах, и даже незначительные перегревы способны вызывать их повреждения или разрушение. Выявление участков максимальной температуры играет важную роль в мониторинге критичных зон и совершенствовании конструкции. В данной работе рассматривается разработка искусственной нейронной сети, способной точно определять максимумы температурного поля.

Обзор литературы. Современные методы анализа температурных полей в жаропрочных материалах включают использование вычислительной гидро- и газодинамики (CFD) и экспериментальных подходов. CFD позволяет моделировать температурное распределение с учётом сложных геометрических форм и условий эксплуатации, но требует значительных вычислительных мощностей и точных исходных данных. Экспериментальные методы, такие как термография и использование тепловых датчиков, дают высокую точность, но сталкиваются с трудностями в экстремальных условиях и с высокой стоимостью оборудования. В последние годы наблюдается активное развитие применения нейронных сетей для моделирования физических процессов. Эти сети эффективно используются для прогнозирования температурных распределений, оценки тепловых потоков и других задач, связанных с анализом сложных нелинейных систем. Ключевые преимущества нейронных сетей: способность обучаться на больших объёмах данных, их адаптивность и возможность работы с неполной или неоднородной информацией.

Основные ограничения традиционных методов, таких как CFD и аналитические подходы, заключаются в их высокой вычислительной сложности, необходимости точного определения физических параметров и ограниченной возможности применения в реальном времени. В отличие от них машинное обучение значительно ускоряет процесс анализа данных. В результате нейронные сети можно рассматривать как один из инструментов при решении теплообменных задач.

Постановка задачи. Модель температурного поля турбинной лопатки строится на основе анализа теплообмена при экстремальных температурах. Лопатка изготавливается из жаропрочного сплава, который отличается высокой термостойкостью и прочностью. Формирование температурного поля происходит из-за теплового излучения горячих газов, конвективного теплообмена с окружающей средой и теплопереноса внутри материала. На модель также оказывают влияние такие параметры, как сложная форма лопатки, неравномерность распределения тепловых потоков и особенности эксплуатационных условий. Задача математически формализуется как поиск точки максимума температурного поля $T(x,y,z)$ на наружной поверхности лопатки, омываемой высокотемпературной газовой средой. Данное температурное поле удовлетворяет уравнению нелинейной теплопроводности для стационарного процесса без внутренних источников теплоты

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = 0$$

и граничному условию на поверхности теплоподвода

$$\alpha(T_g - T) = \lambda \operatorname{grad} T,$$

где T – температура на поверхности лопатки; λ – коэффициент теплопроводности материала лопатки; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности лопатки; T_g – температура нагревающей газовой среды.

Задача поиска максимума сводится к нахождению таких координат (x^*, y^*, z^*) , для которых выполняется условие

$$T(x^*, y^*, z^*) = \max_{(x, y, z) \in S} T(x, y, z),$$

где S – поверхность лопатки.

Данные для анализа включают характеристики материалов, параметры геометрии и внешние воздействия. Используемая информация включает следующие элементы:

- материалы: жаропрочные сплавы, такие как никелевые сплавы, с заранее известными тепловыми свойствами (теплопроводность, удельная теплоёмкость);
- геометрия: трёхмерная модель лопатки, учитывающая все элементы, включая охлаждающие отверстия;
- нагрузки: температура, скорость течения рабочей среды, а также тепловое излучение от продуктов сгорания;
- граничные условия: температура на основании лопатки, параметры охлаждающего воздуха и коэффициенты теплоотдачи для различных участков её поверхности.

Эти данные являются основой для создания и обучения нейронной сети, которая будет прогнозировать точку максимальной температуры на поверхности лопатки с учётом всех факторов эксплуатации.

Методы. Архитектура нейронной сети, используемой для решения задачи нахождения точки максимума температурного поля, основывается на методах, предназначенных для работы с пространственными данными. Для этой задачи была выбрана свёрточная нейронная сеть (CNN), адаптированная для обработки трёхмерных данных. Сеть включает несколько свёрточных и пуллинговых слоёв, которые извлекают пространственные и температурные особенности поля, а также полносвязные слои для выполнения классификации или регрессии с целью предсказания координат максимума температуры. Для улучшения фокусировки сети могут быть использованы механизмы внимания, позволяющие выделять ключевые области температурного поля.

Данные предварительно преобразуются с использованием метода конечных элементов (FEM), который моделирует температурные поля. На вход сети поступают трёхмерные тензоры, представляющие температурные значения на узлах сетки. Эти данные нормализуются для устранения различий в масштабе, а для улучшения качества обучения применяются техники аугментации, такие как случайное вращение, изменение масштаба и добавление шума. Кроме того, набор данных дополняется информацией о граничных условиях и физических характеристиках, которые кодируются как дополнительные признаки. Алгоритмы обучения включают такие компоненты, как функция потерь, регуляризация, оптимизация.

Функция потерь. Для задачи регрессии, направленной на предсказание координат точки максимума, используется функция потерь на основе среднеквадратичной ошибки (Mean Squared Error, MSE):

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|y_i - \hat{y}_i\|^2,$$

где y_i – истинные координаты точки максимума; \hat{y}_i – предсказанные координаты.

Регуляризация. Для предотвращения переобучения используются методы дропаут и нормализации весов. Дополнительно применяется метод ранней остановки, который завершает обучение, когда функция потерь на валидационной выборке стабилизируется.

Оптимизация. Для обновления весов сети применяется алгоритм Adam, который обеспечивает быстрый и стабильный процесс обучения. Начальные параметры, такие как скорость обучения, регулируются с помощью scheduler-методов, которые постепенно уменьшают её значение по мере стабилизации функции потерь.

Применение вышеуказанных методов позволяет эффективно обучить нейронную сеть, способную предсказывать точку максимума температурного поля даже в условиях сложных геометрий и неоднородных тепловых нагрузок.

Результаты экспериментов. Для проверки эффективности предложенного подхода была проведена серия экспериментов, направленных на оценку точности, скорости и устойчивости нейронной сети в задачах определения точки максимума температурного поля на поверхности турбинной лопатки.

Генерация и обработка обучающих данных. Для формирования обучающей выборки использовался метод конечных элементов (FEM) с применением программного обеспечения, специализированного на тепловом анализе сложных конструкций. Геометрия лопатки создавалась в виде трёхмерной модели с детализацией охлаждающих каналов и учётом физических параметров жаропрочного сплава.

Расчёт температурных полей проводился для различных эксплуатационных сценариев:

- температура рабочей среды варьировалась в диапазоне 900...1400 К;
- граничные условия включали конвективный теплообмен с внешней средой и охлаждающим потоком внутри каналов;
- учитывались тепловые нагрузки.

В результате моделирования было сгенерировано 10 000 температурных полей, представленных в виде трёхмерных массивов, содержащих значения температуры в узлах сетки конечных элементов. Для каждого температурного поля координаты точки максимума (x_{\max} , y_{\max} , z_{\max}) извлекались как целевая метка. Массивы данных нормализовались по максимальному значению температуры, а точки были представлены в единицах длины.

Для проверки обобщающей способности сети обучающая выборка включала 80 % данных, а 20 % выделялись на тестирование.

Оценка точности модели на тестовой выборке. Точность модели оценивалась по нескольким метрикам:

- Среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error, MSE) для координат точки максимума:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ||y_i - \hat{y}_i||^2,$$

где y_i – истинные координаты точки максимума; \hat{y}_i – предсказанные координаты.

Для тестовой выборки значение MSE составило 0,05 мм², что свидетельствует о высоком уровне точности.

- Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ||y_i - \hat{y}_i||$$

составила 0,18 мм, что приемлемо для инженерных приложений.

- Средняя ошибка в предсказании температуры в точке максимума составила менее 1,5 %.

Кроме того, был проведён визуальный анализ распределений температуры для предсказанных и истинных точек. Результаты показали хорошее совпадение в зонах перегрева и основных особенностях температурных полей.

Сравнение с традиционными методами. Для оценки эффективности предложенного подхода было протестировано два классических метода:

1. **Аналитические методы.** Упрощённые модели, основанные на решении уравнения теплопроводности для простых геометрий, показали низкую точность. В сложных эксплуатационных условиях ошибка в определении точки максимума достигала 10...15 %.

2. **Метод конечных элементов.** FEM обеспечивал высокую точность (менее 1 %), однако был крайне ресурсоёмким. Расчёт одного поля на специализированной рабочей станции занимал 10...15 мин.

Предложенный метод на основе нейронных сетей показал следующие преимущества:

- **Скорость.** Время предсказания температурного поля с нахождением точки максимума составило менее 0,01 с, что делает метод подходящим для задач в реальном времени.

- **Точность.** Средняя ошибка сравнима с результатами FEM, при этом обеспечивается значительно более высокая производительность.

Устойчивость и обобщающая способность модели. Для проверки устойчивости модели были проведены тесты с использованием данных, отличных от обучающей выборки:

- изменение геометрии охлаждающих каналов;
- добавление шума в исходные данные;
- варьирование тепловых характеристик материала.

Модель продемонстрировала стабильные результаты предсказаний, сохраняя среднюю абсолютную ошибку (MAE) на уровне 0,2 мм, что подтверждает её способность эффективно обобщать и адаптироваться к новым условиям.

Заключение. Результаты экспериментов подтверждают, что предложенный подход на основе нейронной сети позволяет значительно ускорить процесс анализа температурных полей без потери точности. Это открывает новые возможности для применения машинного обучения в задачах теплового анализа и оптимизации конструкций лопаток газотурбинного двигателя.

Представленная нейронная сеть показывает высокую точность в определении точки максимума температурного поля на поверхности турбинной лопатки. Однако в процессе анализа ошибок было выявлено, что в зонах со сложной геометрией или при резких изменениях температурных градиентов модель может либо завышать, либо занижать значения температуры. Для решения данной проблемы требуется разработка гибридных методов, которые сочетают нейронные сети с традиционными физическими моделями для обеспечения высокой точности и надёжности.

Результаты исследования позволят на практике достаточно быстро определять наиболее термонагруженные участки оболочки лопатки газотурбинного двигателя, что в свою очередь позволит оптимизировать работу системы внутреннего охлаждения турбинных лопаток за счёт интенсификации охлаждения в наиболее нагруженных областях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andrianov, I. K. Optimizing Crack Detection in Gas Turbine Blades Using Implanted Capsules of Ionizing Gas in Nonsteady Operation at Nonuniform Temperature / I. K. Andrianov, E. K. Chepurnova // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 11. – P. 1361-1366. – DOI 10.3103/s1068798x23110035.
2. Андреанов, И. К. Оценка предельного давления и геометрии капсул в системе обнаружения трещин лопаток газотурбинного двигателя в условиях нестационарности и температурной неравномерности / И. К. Андреанов, Е. К. Чепурнова // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102. – № 9. – С. 725-730.
3. Andrianov, I. K. Optimal distribution of capsules with active substance for the crack detection system in a turbine blade body / I. K. Andrianov, E. K. Chepurnova // CIS Iron and Steel Review. – 2023. – Vol. 26. – P. 98-104. – DOI 10.17580/cisr.2023.02.16.
4. Bejan A. (2013). Convection Heat Transfer. Wiley.
5. Kline M. Kay, R. (2020). «Deep Learning Applications in Engineering: A Survey». Engineering Computations, 37(4), 1205-1234.
6. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
7. Patankar S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation.
8. Smith R. J., Brown D. L. (2018). «Neural Networks for Predicting Material Properties in High-Temperature Environments». Journal of Computational Physics, 356, 124-137.
9. Kingma D. P., Ba J., (2014). «Adam: A Method for Stochastic Optimization».
10. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. (1986). «Learning Representations by Back-Propagating Errors». Nature, 323, 533-536.
11. Zhou J., et al. (2021). «Physics-informed Machine Learning for Thermal Field Prediction in Aerospace Applications». Applied Thermal Engineering, 183, 116149.
12. Chakraborty S., Goswami S. (2019). «Finite Element Modeling and Neural Networks for Structural Health Monitoring». Structural Control and Health Monitoring, 26(8), e2384.
13. He K., Zhang X., Ren S., Sun J., (2015). «Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification».



Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н.
Ya. Yu. Grigoriev, I. N. Alkhimenko

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ РЕКИ АМУР

USING MACHINE LEARNING FOR THE TASK OF PREDICTING CHANGES IN THE COASTLINE OF THE AMUR RIVER

Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Yan Yu. Grigoriev – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Альхименко Игорь Николаевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Igor N. Alkhimenko – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В работе рассматриваются подходы к решению задач прогнозирования изменения наблюдаемых областей с заданными характеристиками методами машинного обучения на примере задачи прогнозирования изменения береговой линии реки Амур. Производится сравнение методов, и выбирается базовый метод с наибольшей предсказательной способностью для построения интеллектуальной системы. Рассматривается модификация алгоритма путём введения дополнительных характеристик, описывающих скорости и ускорения изменения точек границ. Анализ результатов исследования производится на основе оценки относительной и среднеквадратической ошибок.

Summary. The paper considers approaches to solving problems of forecasting changes in observed areas with given characteristics using machine learning methods on the example of the problem of forecasting changes in the Amur River coastline. The methods are compared and the basic method with the highest predictive ability for building an intelligent system is selected. Modification of the algorithm by introducing additional characteristics describing velocities and accelerations of boundary point changes is considered. The results of the study are analyzed based on relative and RMS error estimation.

Ключевые слова: прогнозирование, береговая линия, дистанционное зондирование, машинное обучение, модификация модели.

Key words: forecasting, coastline, remote sensing, machine learning, model modification.

УДК 004.92

Введение. Проблема обнаружения отклонений состояния земной поверхности от нормального является одной из ключевых задач, решаемых научным сообществом. Для принятия стратегии действия по предотвращению последствий нештатных ситуаций необходимо производить оценку процессов во времени. Задача является актуальной для таких динамических процессов, как разливы нефти, распространение вредных веществ, предсказание паводковой ситуации и т. п.

Для построения модели и оценки её адекватности рассматривается сезонное половодье реки Амур. Данные о паводковом состоянии используются для обучения интеллектуальной системы прогнозирования изменения береговой линии. Применяется интегрированный подход, объединяющий несколько моделей, позволяющих на основе компьютерного зрения строить единую прогнозную модель изменения наблюдаемых областей. Учитываются скорость и ускорение изменений границ береговой линии, что позволяет обучать предсказательную модель без учёта дополнительных характеристик наблюдаемых участков.

На первом этапе исследования сравниваются некоторые наиболее подходящие для исследуемых процессов методы машинного обучения. На основе статистических оценок (среднеквадратичного отклонения) выбирается базовый метод с наименьшей погрешностью результатов.

Базовая модель модифицируется путём введения дополнительных характеристик, описывающих скорости и ускорения изменения береговой линии. Результаты работы методов оцениваются при помощи среднеквадратичной и относительной ошибок.

Методы и материалы. В работе используются данные, полученные с сенсоров спутника Sentinel-2 L2A (см. табл. 1) при помощи ресурса Sentinel-hub. Используются спектральные снимки.

Таблица 1

Спектральные каналы Sentinel-2 L2A

Спектральный канал	Центральная длина волны, нм	Ширина канала, нм
Band 1 – Coastal aerosol	442,7 – 453,9	21
Band 2 – Blue	492,4 – 506,6	66
Band 3 – Green	559,8 – 590,0	36
Band 4 – Red	664,6 – 680,0	31
Band 5 – Vegetation red edge	704,1 – 740,0	15
Band 6 – Vegetation red edge	740,5 – 760,0	15
Band 7 – Vegetation red edge	782,8 – 900,0	20
Band 8 – Vegetation red edge	832,8 – 850,0	106
Band 9 – Water vapour	945,1 – 950,0	20
Band 11 – SWIR	1613,7 – 1700,0	91
Band 12 – SWIR	2202,4 – 2300,0	175
Band 8A – NIR	864,7 – 885,0	21

Первоначально обрабатываются изображения, полученные с использованием 4, 3 и 2 спектральных каналов (см. рис. 1), затем используются 3 и 11 спектральные каналы для классификации воды при помощи индекса NDSI (см. рис. 2).

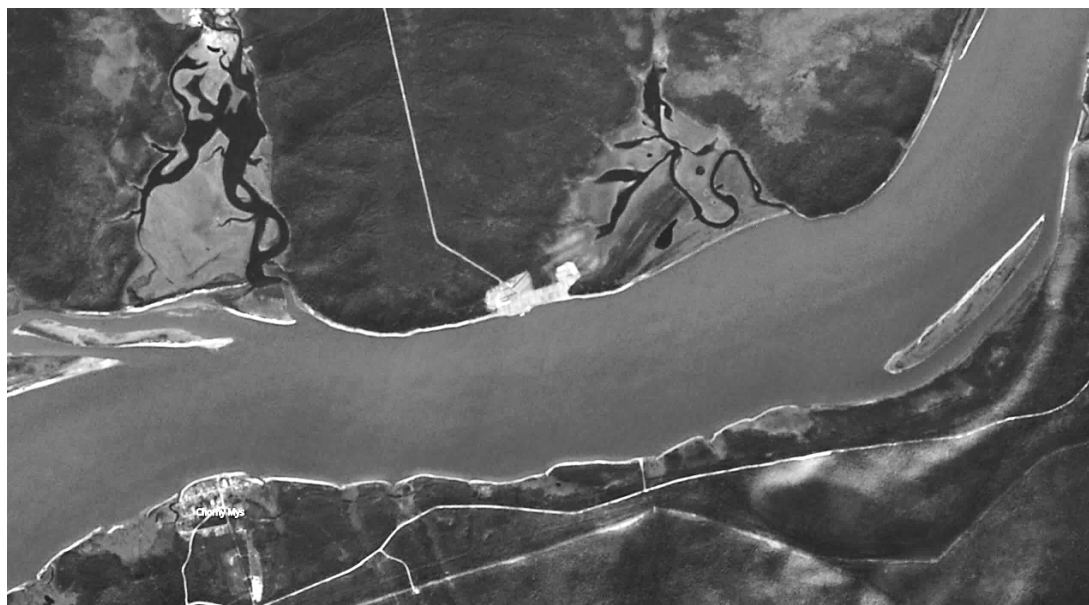


Рис. 1. Спутниковое изображение реки Амур



Рис. 2. Классификация области интереса при помощи индекса NDSI

На основе изображений с выделенной водной поверхностью создаются бинарные маски при помощи алгоритма k -ближайших средних. На бинарных изображениях фиксируется присутствие шумов, обусловленных влиянием географических особенностей исследуемой местности, погодными явлениями или человеческой деятельностью. Обработка шумов на изображениях осуществляется при помощи гауссова ядра размером 5×5 пикселей.

После удаления шумов на бинарных масках выделяются границы реки при помощи метода Кэнни (см. рис. 3).

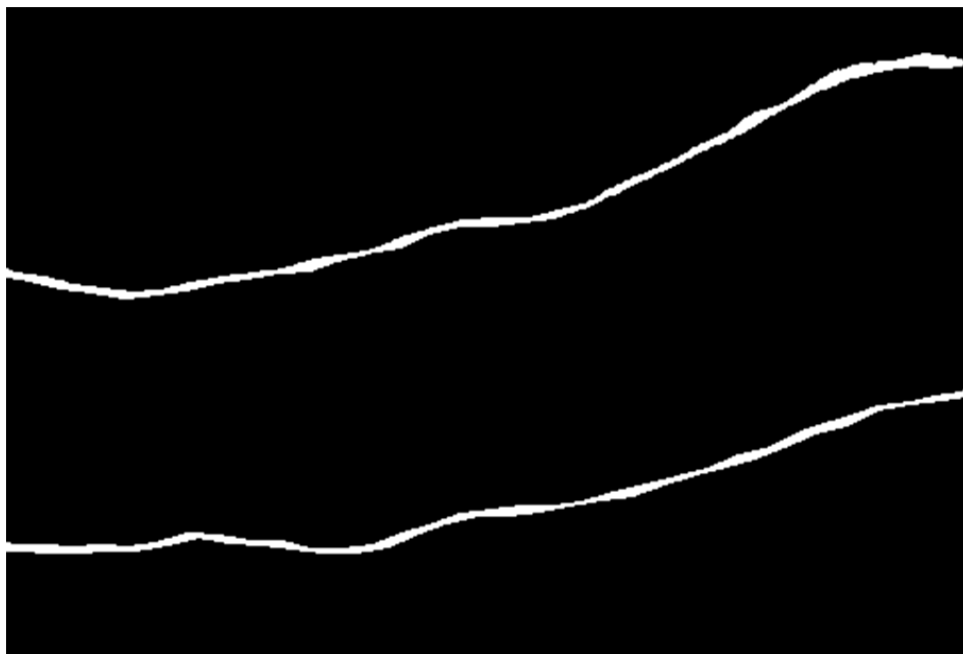


Рис. 3. Границы реки Амур

Формируется матрица координат пикселей, принадлежащих к границе исследуемой области, записываемая в файл формата .csv.

Задача прогнозирования состоит в нахождении целевых меток y (верхняя и нижняя границы) для соответствующего фиксированного x . Пиксели в файле .csv группируются по датам, затем по координатам x .

Оценивается эффективность некоторых методов машинного обучения для задачи прогнозирования. На вход поступают следующие данные: дата, координата x , координата y нижней границы, координата y верхней границы. Каждый объект анализа (пиксель) описывается парой значений (x, y) представляющих собой координаты в декартовой системе. Значения x соответствуют ширине изображения.

Для выбора базового метода машинного обучения производится сравнение 4 методов: 1 – линейная регрессия, 2 – случайный лес, 3 – метод опорных векторов, 4 – градиентный бустинг.

В табл. 2 представлены результаты сравнения методов на основе оценки относительной и среднеквадратической ошибок.

Таблица 2

Сравнение моделей машинного обучения

Ошибка	Линейная регрессия	Случайный лес	Градиентный бустинг	Метод опорных векторов
Среднеквадратическая, пиксели	410,6	386,189	385,779	383,86
Средняя относительная, %	1,35	0,97	0,97	0,95

В качестве базового метода машинного обучения выбирается метод опорных векторов (Support Vector Regression, SVR) (см. рис. 4).

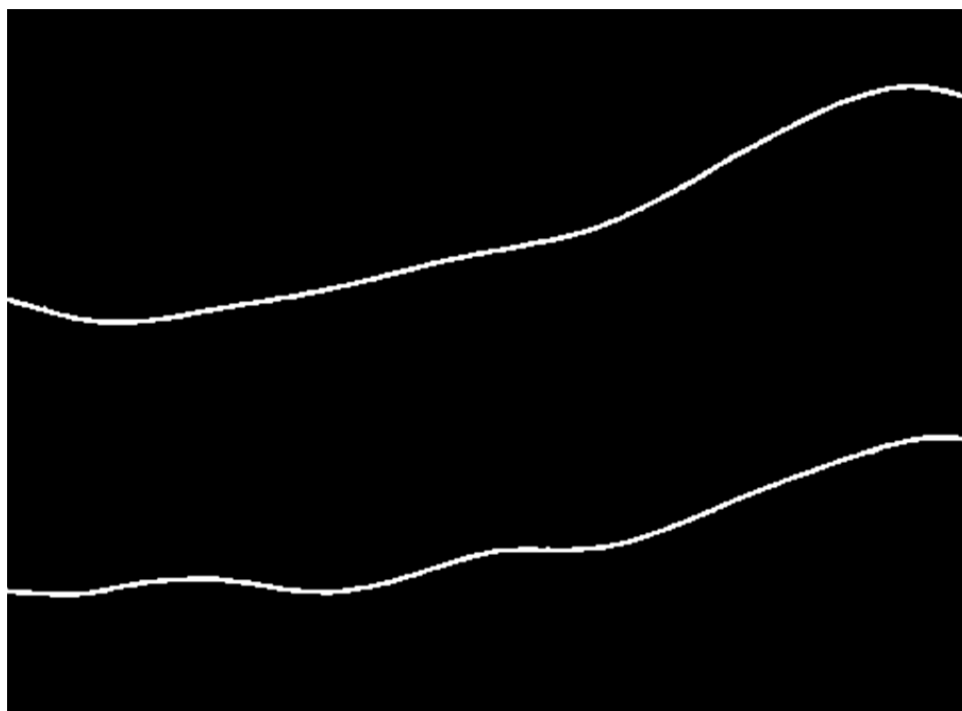


Рис. 4. Результат предсказания по методу опорных векторов

Построение прогнозных моделей. После выбора базового метода машинного обучения и проведения предварительной обработки данных реализуются 2 модели. Первая модель – базовая, использующая обучающие данные с указанием положения границ реки в соответствующие моменты времени. Вторая модель – модифицированная.

Для реализации моделей машинного обучения решается задача нахождения функций $y_i = f_i(x_i)$, $i = \overline{1,2}$, описывающих верхнюю и нижнюю границы рек, обеспечивающих минимальную ошибку предсказания в эпсилон-области. Для оценки эффективности предсказательной моде-

ли и её успешного обучения используется функция потерь: $L(y_i, f(x_i)) = \begin{cases} 0 & \text{при } |y_i - f(x_i)| - \varepsilon \\ |y_i - f(x_i)| - \varepsilon & \end{cases}$, где y_i – истинное значение, $f(x_i)$ – предсказанное значение, ε – ширина эпсилон-области. Для нахождения регрессионной функции, описывающей изменения береговой линии, решается следующая оптимизационная задача: $\min_{\omega, b} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*)$, где ω – вектор весов модели, b – параметр, отвечающий за вертикальное смещение линии регрессии относительно оси y , $\|\omega\|^2$ – евклидова норма весов модели, $\|\omega\|^2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}$, C – параметр нормирования максимизации ширины эпсилон-области и минимизации ошибок, ξ_i – ошибки отклонения в большую сторону от предсказанных значений, ξ_i^* – ошибки отклонения в меньшую сторону от предсказанных значений. Задача решается при заданных ограничениях:

$$\begin{cases} y_i - (\omega^T x_i + b) \leq \epsilon + \xi_i \\ (\omega^T x_i + b) - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i^*, \xi_i \geq 0 \end{cases}$$

где ϵ – ширина допустимой погрешности предсказания.

Для нахождения оптимальных весов ω и смещения b решается задача Каруша – Куна – Таккера, представляемая следующим образом: $\alpha_i(\epsilon - |y_i - f_i(x_i)|) = 0$, где α_i – множитель Лагранжа для i -го набора данных.

Оценка предсказательной способности базовой модели определяется относительной и среднеквадратической ошибками.

Ставится задача повышения точности предсказательной модели путем её модификации, обеспечивающейся введением весовых коэффициентов, определяемых скоростью v и ускорением a изменения координат точек границ береговой линии. После группировки набора данных по дате и координате x для каждого пикселя находятся значения: 1) $v_j = y_{j+1} - y_j$, 2) $a_j = v_{j+1} - v_j$, $j = \overline{1, 1200}$ (при $t = 1$).

Результаты работы базовой и модифицированной моделей оцениваются при помощи среднеквадратической и относительной ошибок. По сравнению с базовой, точность модифицированной модели выше на 6 % (см. табл. 3).

Таблица 3

Сравнение базовой и модифицированной моделей

Ошибки	Верхняя береговая линия (базовая модель)	Нижняя береговая линия (базовая модель)	Верхняя береговая линия (с весами)	Нижняя береговая линия (с весами)
Среднеквадратическая, пиксели	6,524	6,048	5,767	5,481
Относительная, %	0,75	1,28	0,71	1,17

Введение данных параметров позволяет производить обучение модели более эффективно за счёт корректной обработки интервалов постоянства функции, которые обусловлены стоячей водой и сезонной составляющей.

Если наблюдается более двух точек границ, соответствующих одному значению абсциссы, то изображение разбивается на отдельные части таким образом, чтобы привести исходные данные к стандартному виду, содержащему 2 точки (верхняя и нижняя границы).

Данные ситуации возникают, когда имеются резкие изменения формы русла реки, раздвоение русла или наличие протоков. Наглядно результаты моделирования представлены на рис. 5-6.



Рис. 5. Реальная и прогнозные предсказываемые границы

Графическое представление результатов работы (см. рис. 5) и оценка среднеквадратической и относительной ошибок позволяют сделать вывод о том, что введение дополнительных параметров скорости и ускорения изменений границ береговой линии существенно повлияло на точность прогнозной модели.

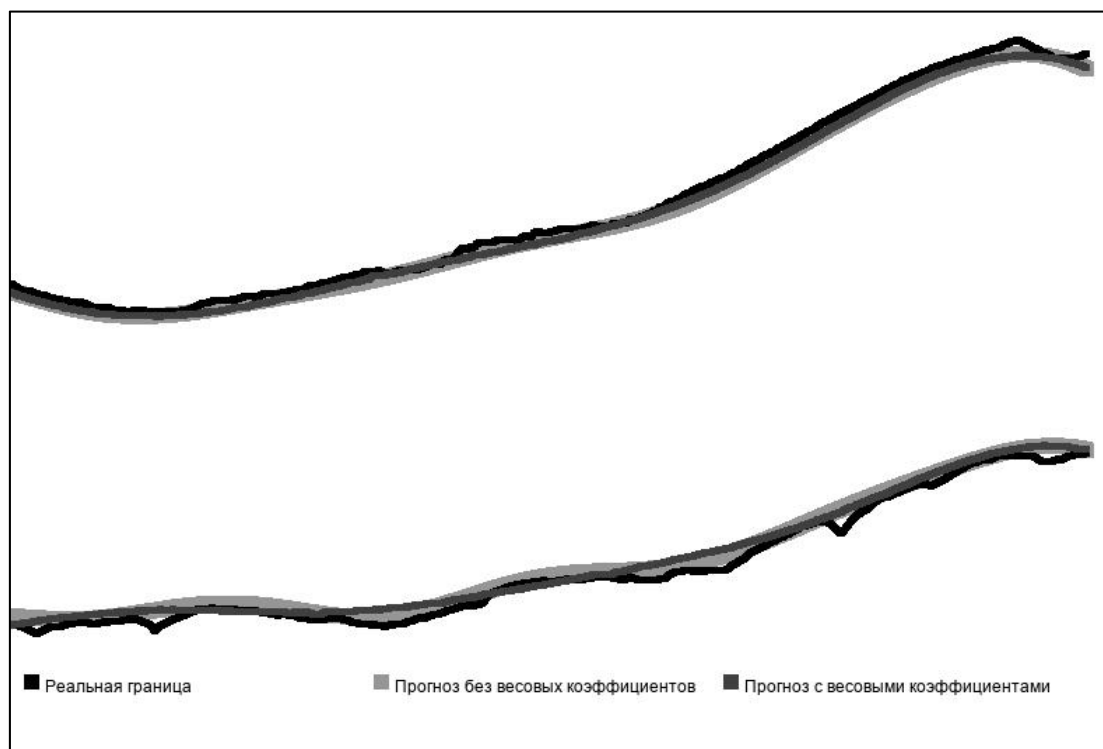


Рис. 6. Сравнение границ (обработка)

Общая схема работы интеллектуальной системы представлена на рис. 7.



Рис. 7. Блок-схема работы интеллектуальной системы

Заключение. В результате исследования разработана интеллектуальная система оценки динамики изменения границ контролируемой области на примере береговой линии реки Амур на основе спектральных спутниковых данных. Произведён сравнительный анализ некоторых методов машинного обучения, в качестве базового выбран метод опорных векторов. Введены дополнительные характеристики в виде скорости и ускорения изменения функций, описывающих береговые линии. Введение дополнительных характеристик обеспечило повышение точности модели в среднем на 6 %. На текущем этапе работы в интеллектуальную систему интегрируется модель

временного ряда, обеспечивающая оценку сезонной составляющей. Учёт дополнительной информации позволит обеспечить повышение точности прогноза модифицированной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Детектирование состояния поверхности / Е. П. Жарикова, И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 58-63.
2. Zharikova, E. P. Surface state detection / E. P. Zharikova, J. U. Grigoriev, A. L. Grigoryeva // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – P. 8934205.
3. Жарикова, Е. П. Применение искусственного интеллекта в задачах анализа состояния акваторий / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 129-133.
4. Амосов, О. С. Моделирование обнаружения и распознавания аномального поведения динамических систем / О. С. Амосов, С. Г. Амосова // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020. Труды тринадцатой международной конференции / под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. – М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2020. – С. 1151-1158.
5. Zharikova, E. P. Applications of Computer Vision in Cross-Sectoral Tasks / Zharikova E. P., Grigoriev Y. Y., Grigorieva A. L. // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. – Warsaw, 2021. – P. 415-426.
6. Жарикова, Е. П. Применение методов машинного обучения в задачах мониторинга мирового океана и континентальных поверхностных вод / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № VII (63). – С. 33-40.
7. Жарикова, Е. П. Анализ изменения спектральных характеристик водной поверхности реки Амур / Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 28-39.
8. Вьюгин, В. В. Элементы математической теории машинного обучения: учеб. пособие / В. В. Вьюгин. – М.: МФТИ, 2010. – 231 с.



Тукмаков Д. А.
D. A. Tukmakov

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МОНОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

NUMERICAL MODELING OF MONODISPERSE AEROSOL VIBRATIONS IN AN ACOUSTIC RESONATOR WITH DIFFERENT DISPERSE PHASE PARAMETERS

Тукмаков Дмитрий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ИММ Казанского научного центра Российской академии наук (Россия, Казань); тел. 8(965)600-67-63. E-mail: tukmakovda@imm.knc.ru.

Dmitry A. Tukmakov – PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Russia, Kazan); tel. 8(965)600-67-63. E-mail: tukmakovda@imm.knc.ru.

Аннотация. В данной работе численно моделируется динамика монодисперсной газозвеси в акустическом резонаторе закрытого типа на частоте второго линейного резонанса. Течение многофазной среды рассматривалось в осесимметричном случае. Несущая среда описывается как вязкий сжимаемый теплопроводный газ. Математическая модель реализует континуальную методику моделирования динамики неоднородных сред – для несущей среды и дисперсной фазы решалась полная гидродинамическая система уравнений движения, учитывался обмен импульсом и теплообмен между несущей средой и дисперсной фазой. Система уравнений динамики монодисперсной газозвеси включает в себя уравнения непрерывности плотности, уравнения сохранения пространственных составляющих импульса несущей среды и дисперсной фазы, уравнения сохранения энергии. Для дисперсной фазы вводится понятие средней плотности – произведения объёмного содержания на физическую плотность материала. Объёмное содержание является функцией временной и пространственных переменных, физическая плотность материала является постоянной величиной. Уравнения математической модели решались явным конечно-разностным методом Мак-Кормака. Для подавления численных осцилляций применялась схема нелинейной коррекции. Рассмотрено влияние дисперсности частиц и объёмного содержания дисперсной фазы на динамику несущей среды и дисперсной фазы газозвеси.

Summary. In this paper, the dynamics of a monodisperse gas suspension in a closed-type acoustic resonator at the frequency of the 2nd linear resonance is numerically simulated. The flow of a multiphase medium was considered in an axisymmetric case. The carrier medium is described as a viscous compressible heat-conducting gas. The mathematical model implements a continuum technique for simulating the dynamics of inhomogeneous media: a complete hydrodynamic system of equations of motion was solved for the carrier medium and the dispersed phase, and momentum exchange and heat exchange between the carrier medium and the dispersed phase were taken into account. The system of equations for the dynamics of a monodisperse gas suspension includes the equations of density continuity, equations of conservation of spatial components of the momentum of the carrier medium and the dispersed phase, and equations of conservation of energy. For the dispersed phase, the concept of average density is introduced – the product of the volume content and the physical density of the material. The volume content is a function of time and spatial variables, the physical density of the material is a constant. The equations of the mathematical model were solved by the explicit finite-difference McCormack method. A nonlinear correction scheme was used to suppress numerical oscillations. The influence of particle dispersion and volume content of the dispersed phase on the dynamics of the carrier medium and the dispersed phase of the gas suspension was considered.

Ключевые слова: численное моделирование, газозвеси, акустический резонатор, межфазное взаимодействие.

Key words: numerical modeling, gas suspensions, acoustic resonator, interphase interaction.

Работа выполнена за счёт гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (Соглашение № 84/2024-ПД от 16 декабря 2024 г.).

УДК 532.533

Введение. Одной из областей математического моделирования является моделирование динамических процессов в сплошных средах [1–20]. Частным случаем динамических процессов являются резонансные колебания столба газа в трубах и каналах [1]. Так как многие математические модели гидродинамики имеют нелинейный характер, то для интегрирования уравнений применяются численные методы. В некоторых случаях в качестве объекта моделирования рассматриваются течения неоднородных сред. В отличие от классической гидродинамики [2] в гидродинамике неоднородных сред [3] течения определяются взаимодействием между компонентами смеси. В монографии [3] представлена общая теория динамики многофазных сред. В монографии [4] в одномерном приближении без учёта вязкости среды разработаны математические модели и проведены численные расчёты динамики запылённых, газокапельных и порошковых сред. В монографии [5] разработаны магматические модели, численные алгоритмы моделирования и приведены результаты расчётов ударно-волновых и детонационных процессов в газовзвесах металлических частиц. В работе [6] представлен обзор технологий нанесения на поверхности покрытий с помощью дисперсных потоков, движущихся в аэродинамическом и электрическом поле. В статье [7] исследуются возможности повышения эффективности работы аппаратов очистки газодисперсных сред от дисперсных включений. В работе [8] приведены аналитические формулы расчёта перепада давления газа на двухслойных фильтрах. Предложенные аналитические формулы позволяют учитывать такие параметры, как высота фильтровального слоя, размер гранул и каналов в фильтровальном материале, дисперсность и концентрация пыли. В публикации [9] экспериментально исследуются процессы массопереноса частиц аэрозоля в цилиндрической трубе, обнаружено влияние акустических полей на формирование областей концентрирования дисперсных частиц. В статье [10] для описания работы устройств промышленной экологии представлена математическая модель процесса коагуляции капель газокапельной среды под действием акустических полей. Недостаток математической модели состоял в пренебрежении газовой динамикой процесса, поскольку поля скорости несущей среды определялись как фиксированные величины. В работе [11] сделан обзор проблем и особенностей изучения двухфазных потоков. Указывается важность учёта межфазного взаимодействия при описании течений двухфазных сред. В частности, высказывается предположение о преимуществе континуальных математических моделей динамики газодисперсных сред над прочими при описании потоков с большим содержанием дисперсных частиц. В работе [12] численно исследуется влияние динамических процессов двухфазной среды на производительность башенной испарительной градирни. Математическая модель не учитывала двухфазный состав смеси. В публикации [13] исследованы аэродинамические характеристики сухого инерционного пылеуловителя с соосными трубами. Математическая модель основана на численном решении системы уравнений Навье – Стокса однородной среды и не учитывала динамику дисперсных частиц.

Интерес к динамике дисперсных частиц в акустических полях связан с вопросами промышленной экологии, энергетики и химической промышленности. При этом часто в исследованиях пренебрегают многофазным составом моделируемой среды, динамикой газа при исследовании массопереноса частиц или влиянием дисперсных частиц на поток газа. Применяемая в данной работе математическая модель учитывает межфазный теплообмен и межфазный обмен импульсом. В работе исследовано влияние дисперсности частиц на параметры динамики несущей среды и дис-

персных включений при колебаниях аэрозоля в закрытой трубе на частоте второго линейного резонанса закрытой трубы.

Материалы и методы. Математическая модель реализовывала континуальную методику моделирования динамики неоднородных сред, позволяющую учесть межфазный обмен импульсом и энергией с дисперсной фазой [4; 14–16]. В качестве несущей среды рассматривается сжимаемый газ, движение которого описывается системой уравнений Навье – Стокса [17; 18]. В осесимметричной системе координат в двумерном случае [18] система уравнений выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = -\rho v / y, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv - \tau_{xy}) = (\rho uv + \tau_{xy}) / y + \alpha \frac{\partial p}{\partial x} - F_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p - \tau_{yy}) = (-\rho v^2 + \tau_{yy}) / y + \alpha \frac{\partial p}{\partial y} - F_y, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left([e + p - \tau_{xx}] u - \tau_{xy} v + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left([e + p - \tau_{yy}] v - \tau_{xy} u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \\ & = \left(-v(e + (1 - \alpha)p - \tau_{yy}) + \tau_{xy} u - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) / y + \alpha \frac{\partial}{\partial x}(u p) + \alpha \frac{\partial}{\partial y}(v p) - Q - |F_x|(u - u_1) - |F_y|(v - v_1), \end{aligned} \quad (4)$$

$$p = (\gamma - 1) \left(e - 0.5 \rho (u^2 + v^2) \right), \quad e = \rho I + 0.5 \rho (u^2 + v^2),$$

$$\tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{yy} = \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right),$$

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

где ρ – плотность; u, v, u_1, v_1 – составляющие скорости несущей и дисперсной среды; e – полная энергия; λ, μ – соответственно коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости несущей среды. Величины F_x, F_y, Q задаются законами межфазного трения и теплообмена, $I = RT/(\gamma - 1)$ – внутренняя энергия газа.

Движение дисперсной фазы описывается уравнением сохранения средней плотности [4, 14–16], уравнениями сохранения составляющих импульса и уравнением сохранения внутренней энергии:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial y} = -\rho_1 v_1 / y, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_1^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_1 u_1 v_1) = -\rho_1 u_1 v_1 / y + F_x + \alpha \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 u_1 v_1) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_1^2) = -\rho v_1^2 / y + F_y + \alpha \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(e_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_1 u_1) + \frac{\partial}{\partial y}(e_1 v_1) = -e_1 v_1 / y + Q, \quad (8)$$

$$\rho_1 = \alpha \rho_{10}, \quad e_1 = \rho_1 C_p T_1,$$

где T_1 , e_1 , ρ_1 , α – соответственно температура дисперсной фазы, внутренняя энергия дисперсной фазы, средняя плотность и объёмное содержание; C_p , α_{10} – соответственно теплоёмкость и плотность вещества твёрдой фазы. Все частицы предполагаются одинакового размера и сферической формы. Составляющие силы трения F_x и F_y включают в себя силу аэродинамического сопротивления, динамическую силу Архимеда и силу присоединённых масс и задаются следующим образом [3]:

$$F_x = \frac{3}{4} \frac{\alpha}{d} C_d \rho \sqrt{(u - u_1)^2 + (v - v_1)^2} (u - u_1) + \alpha \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ + 0.5 \alpha \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u_1}{\partial t} - u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} - v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right),$$

$$F_y = \frac{3}{4} \frac{\alpha}{d} C_d \rho \sqrt{(u - u_1)^2 + (v - v_1)^2} (v - v_1) + \alpha \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ + 0.5 \alpha \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v_1}{\partial t} - u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} - v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right),$$

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}_{10}} + \frac{4}{\text{Re}_{10}^{0.5}} + 0.4, \quad M_{10} = |\bar{V} - \bar{V}_1| / c, \quad |V| = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad |V_1| = \sqrt{u_1^2 + v_1^2},$$

$$\text{Re}_{10} = \rho |\bar{V} - \bar{V}_1| d / \mu, \quad \text{Pr} = \gamma C_p \mu / \lambda, \quad \text{Nu}_1 = 2 \exp(-M_{10}) + 0.459 \text{Re}_{10}^{0.55} \text{Pr}^{0.33},$$

$$0 \leq M_{10} \leq 2, \quad 0 \leq \text{Re}_{10} < 2 \cdot 10^5,$$

где C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления частиц [4]; M_{10} – относительное число Маха; Re_{10} – относительное число Рейнольдса.

Температура несущей среды находится из уравнения $T = (\gamma - 1)(e/\rho - 0.5(u^2 + v^2))/R$. Внутренняя энергия взвешенной в газе твёрдой фазы определяется как $e_1 = \rho_1 C_p T_1$. В уравнение энергии для несущей фазы входит коэффициент теплопроводности газа λ и тепловой поток за счёт теплообмена между газом и частицей [4]: $Q = 6\alpha \text{Nu}_1 \lambda (T - T_1)/d^2$.

Полученные системы дифференциальных уравнений в частных производных (1) – (8) решались явным конечно-разностным методом Мак-Кормака [17] с расщеплением по пространственным направлениям [18] и схемой нелинейной коррекции [19; 20].

Сопоставление физического эксперимента с численными расчётами проведено в работе [14].

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим динамику монодисперсной газовой взвеси при резонансных режимах колебаний несущей среды в закрытой цилиндрической трубе, продольные колебания в которой возбуждаются поршнем, перемещающимся по гармоническому закону (см. рис. 1). В численных расчётах длина трубы составляла $L = 1$ м, диаметр $d = 0.06$ м. Газовая взвесь в начальный момент времени представляет собой смесь воздуха с равномерно распределёнными в объёме резонатора частицами твёрдой фазы – сферами одинакового диаметра с фиксированной плотностью вещества. В начальный момент времени газовая взвесь неподвижна, температуры фаз равны $T_0 = T_{10}$, заданы плотность воздуха, вещества дисперсной фазы и её объёмное содержание α . При $t = 0$ поршень начал движение по гармоническому закону $x(t) = a \cdot \sin(\omega \cdot t)$, где ω – вторая резонансная частота колебаний газового столба в закрытом акустическом резонаторе [1], $\omega_2 = 2\pi c/L$, $a = 1$ мм.

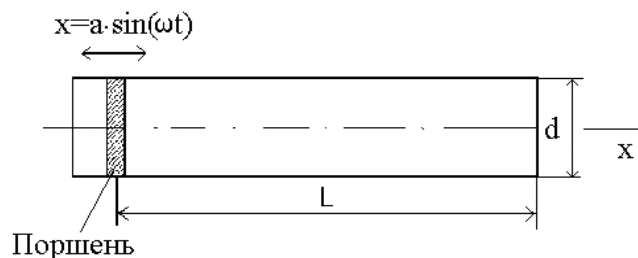


Рис. 1. Схема резонатора

Параметры несущей среды газовой взвеси: $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса воздуха, теплопроводность несущей среды предполагалась равной $\lambda = 0.02553$ Вт/(м·К), динамическая вязкость несущей среды $\mu = 1.72 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\gamma = 1.4$, $R = 8.31$ Дж/(моль·К). Начальная плотность несущей среды – $\rho_0 = 1.29$ кг/м³. В начальный момент времени и газ, и частицы неподвижны, задана одинаковая температура газа и частиц $T_0 = 293$ К. Скорость звука определялась по формуле $c = \sqrt{M^{-1} \gamma R T}$ и при указанных параметрах несущей среды $c = 342.84$ м/с. Линейная частота колебаний газового столба $\nu_2 = \omega_2 / 2\pi = c/L = 342.84$ Гц. При постановке численных экспериментов задавалась плотность вещества дисперсной фазы $\rho_{10} = 1000$ кг/м³. При расчётах на неподвижных поверхностях, в частности в закрытом конце трубы, все составляющие скоростей фаз приравнялись нулю, для остальных газодинамических функций задавались однородные граничные условия второго рода. На оси трубы для составляющих скорости ставились условия симметрии, для плотности, давления и температуры – однородные граничные условия второго рода. На поверхности поршня осевая составляющая скорости изменялась по гармоническому закону, радиальная составляющая скорости приравнялась нулю.

Рассмотрим влияние объёмного содержания дисперсной фазы на интенсивность колебаний несущей среды крупнодисперсной газовой взвеси ($d = 200$ мкм), продольные составляющие скорости представлены на рис. 2.

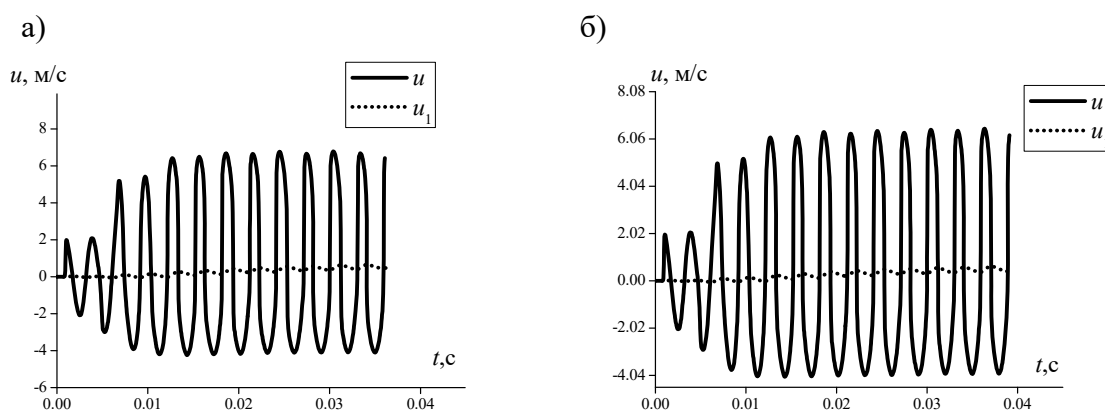


Рис. 2. Продольная составляющая скорости для размера частиц $d = 200$ мкм: а – объёмное содержание дисперсной фазы $\alpha = 0.0001$; б – объёмное содержание дисперсной фазы $\alpha = 0.001$

При увеличении объёмного содержания дисперсной фазы уменьшается величина размаха продольной скорости несущей среды $|u_{\max} - u_{\min}| = U$, для объёмных содержаний $\alpha = 0.0001$ и $\alpha = 0.001$ отношение размаха изменения продольной скорости несущей среды составляет $U_{\alpha=0.001}/U_{\alpha=0.0001} = 0.94$. Отношение размаха изменения продольной скорости дисперсной фазы $|u_{1\max} - u_{1\min}| = U_1$ к соответствующему параметру несущей среды для объёмных содержаний $\alpha = 0.0001$ и $\alpha = 0.001$ составляет соответственно $U_{1\alpha=0.001}/U_{\alpha=0.001} = 0.022$ и $U_{1\alpha=0.001}/U_{\alpha=0.001} = 0.02$

соответственно, это означает, что при большем объёмном содержании дисперсной фазы наблюдается меньшее скоростное скольжение фаз. При колебаниях газовзвеси с резонансными частотами происходит дрейф дисперсных включений [1], приводящий к концентрированию частиц (см. рис. 3).

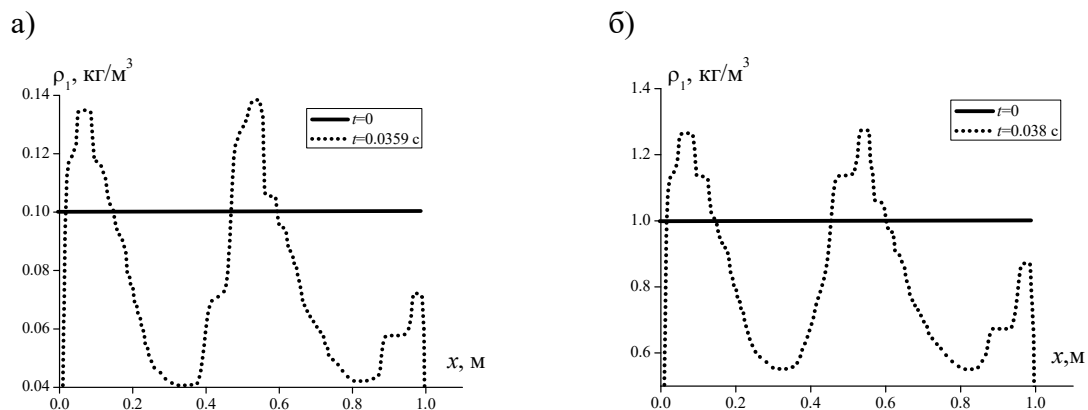


Рис. 3. Средняя плотность дисперсной фазы для размера частиц $d = 200$ мкм: а – объёмное содержание дисперсной фазы $\alpha = 0.0001$; б – объёмное содержание дисперсной фазы $\alpha = 0.001$

Численные расчёты средних плотностей крупнодисперсного аэрозоля $d = 200$ мкм для объёмных содержаний $\alpha = 0.001$ и $\alpha = 0.0001$ демонстрируют, что для меньших объёмных содержаний дисперсной фазы концентрирование крупнодисперсных частиц происходит немного более интенсивно: $\rho_{1\max}/\rho_{1t=0} = 1.28$ и $\rho_{1\max}/\rho_{1t=0} = 1.39$ от начальной средней плотности $\rho_{1t=0}$. Численные расчёты динамики мелкодисперсного аэрозоля $d = 2$ мкм для объёмных содержаний $\alpha = 0.001$ и $\alpha = 0.0001$ демонстрируют, что продольная составляющая скорости дисперсной фазы изменяется так же, как и скорость несущей среды (см. рис. 4).

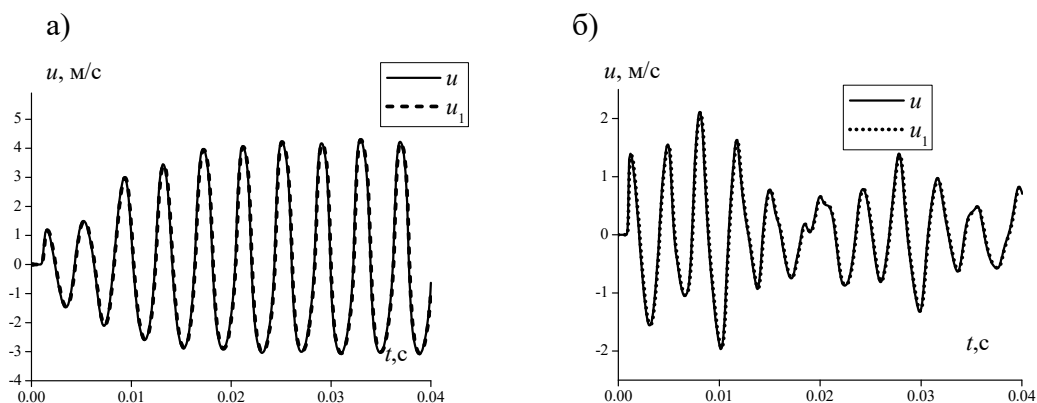


Рис. 4. Продольная составляющая скорости для размера частиц $d = 2$ мкм: а – объёмное содержание $\alpha = 0.0001$; б – объёмное содержание $\alpha = 0.001$

Для объёмного содержания $\alpha = 0.0001$ отношение размаха изменения продольной скорости несущей среды газовзвеси при дисперсности частиц $d = 2$ мкм и $d = 200$ мкм составляет $U_{d=2}/U_{d=200} = 0.73$. При увеличении объёмного содержания дисперсных частиц до $\alpha = 0.001$ отношение размаха изменения продольной скорости несущей среды мелко- и крупнодисперсного аэрозоля составляет $U_{d=2}/U_{d=200} = 0.28$. Для мелкодисперсного аэрозоля ($d = 2$ мкм) отношение размаха

изменения продольной скорости несущей среды для объёмных содержаний дисперсной фазы $\alpha = 0.001$ и $\alpha = 0.0001$ составляет $U_{\alpha=0.001}/U_{\alpha=0.0001} = 0.36$.

Выявленные закономерности можно объяснить тем, что при увеличении объёмного содержания при фиксированной плотности дисперсной фазы увеличивается масса дисперсной фазы, а значит, происходит большая потеря кинетической энергии несущей среды. Также интенсивность межфазного взаимодействия определяется площадью контакта несущей среды и дисперсной фазы. При фиксированном объёмном содержании уменьшение линейного размера сферических частиц приводит к уменьшению площади одной частицы в квадратичной пропорции, тогда как общее количество частиц возрастает в кубической пропорции. Следовательно, площадь межфазного взаимодействия при уменьшении линейного размера частиц кратно возрастает. Таким образом, в мелкодисперсных аэрозолях происходит более интенсивное межфазное взаимодействие.

Сопоставление средних плотностей мелкодисперсных аэрозолей ($d = 2$ мкм) для объёмных содержаний $\alpha = 0.001$ и $\alpha = 0.0001$ показывает, что для меньшего объёмного содержания дисперсной фазы процесс концентрирования существенно более интенсивный: $\rho_{1\max}/\rho_{1t=0} = 1.19$ и $\rho_{1\max}/\rho_{1t=0} = 1.8$ (см. рис. 5).

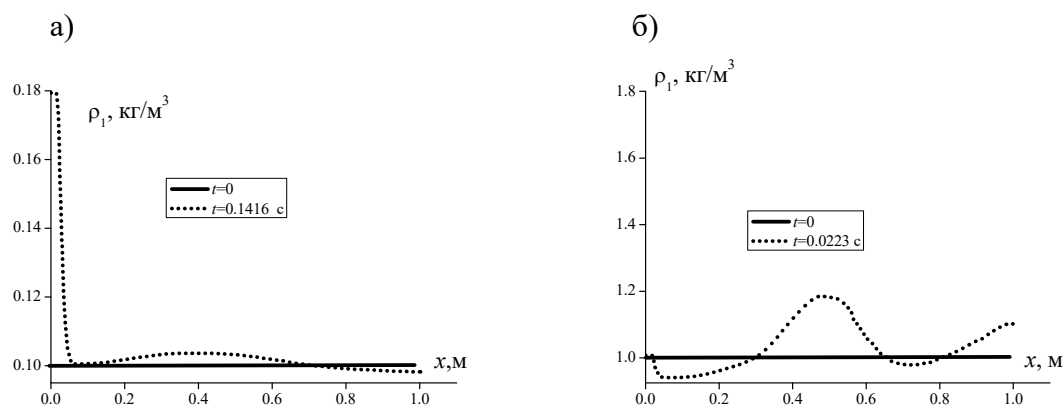


Рис. 5. Средняя плотность дисперсной фазы для размера частиц $d = 200$ мкм:
а – объёмное содержание дисперсной фазы $\alpha = 0.0001$;
б – объёмное содержание дисперсной фазы $\alpha = 0.001$

Выводы. В работе представлены результаты численного моделирования динамики газозвези в акустическом резонаторе – закрытой трубе. Математическая модель реализовывала континуальную методику моделирования динамики неоднородных сред, также учитывались вязкость и теплопроводность несущей среды. Численные расчёты демонстрируют, что при увеличении объёмного содержания дисперсной фазы скорость несущей среды уменьшается как для аэрозолей с мелкодисперсными частицами, так и для аэрозолей с крупнодисперсными частицами. При этом скорость несущей среды в аэрозоле с мелкодисперсными частицами существенно меньше скорости несущей среды в аэрозоле с крупнодисперсными частицами. Скорость дисперсной фазы для мелкодисперсных аэрозолей согласуется со скоростью газа. Скорость дисперсной фазы крупнодисперсных частиц существенно меньше скорости несущей среды. Также расчёты показывают, что для малых объёмных содержаний концентрирование дисперсных включений под действием резонансных акустических колебаний газа происходит более интенсивно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников, В. А. Введение в физическую акустику / В. А. Красильников, В. В. Крылов. – М.: Наука, 1984. – 403.
2. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 784 с.
3. Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.

4. Кутушев, А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах / А. Г. Кутушев. – СПб.: Недра, 2003. – 284 с.
5. Федоров, А. В. Волновые процессы в газовзвесах частиц металлов / А. В. Федоров, В. М. Фомин, Т. А. Хмель. – Новосибирск: Параллель, 2015. – 301 с.
6. Григорьев, С. Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве / С. Н. Григорьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1 (1). – С. 92-98.
7. Золотарева, О. Г. Аэрозольная очистка промышленных газов / О. Г. Золотарева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1 (16). – С. 110-114.
8. Романюк, Е. В. Особенности расчёта общего перепада давления на двухслойных фильтрах для очистки воздуха / Е. В. Романюк // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 61-68.
9. Hoda, Y. Aerosol agglomeration by aerial ultrasonic sources containing a cylindrical vibrating plate with the same diameter as a circular tube/ Y. Hoda, T. Asami, H. Miura // Japanese Journal of Applied Physics. – 2022. – Vol. 61. – No SG.
10. Numerical simulation of condensation of natural fog aerosol under acoustic wave action / C. Liu, Y. Zhao, Z. Tian, H. Zhou // Aerosol and Air Quality Research. – 2021. – Vol. 21. – No 4. – P. 1-21.
11. Вараксин, А. Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков с твёрдыми частицами, каплями и пузырями / А. Ю. Вараксин // Теплофизика высоких температур. – 2023. – Т. 61. – № 6. – С. 926-948.
12. Доброго, К. В. Моделирование башенной испарительной градирни и влияния аэродинамических элементов на её работу в условиях ветра / К. В. Доброго, К. М. Хеммасиан, Е. Е. Ласко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 6. – С. 47-60.
13. Численное моделирование газодинамики в центробежном классификаторе / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Н. Ф. Сахибгареев, Д. Н. Латыпов, М. Г. Гарипов // Вестник Технологического университета. – 2021. – Т. 24. – № 12. – С. 128-132.
14. Тукмаков, Д. А. Сопоставление результатов физических экспериментов по нелинейным колебаниям аэрозоля в акустических резонаторах с численными расчётами на основе математической модели гетерогенной сплошной среды / Д. А. Тукмаков, Н. А. Тукмакова // Проблемы механики и управления. Нелинейные динамические системы. – 2019. – Т. 51. – С. 87-96.
15. Тукмаков, Д. А. Численное исследование влияния граничных условий на расчёты динамики полидисперсной газовзвеси / Д. А. Тукмаков // Прикладная математика и механика. – 2024. – Т. 88. – № 3. – С. 422-433.
16. Тукмаков, А. Л. Численное исследование влияния коагуляции на динамику двухфракционной газовзвеси / А. Л. Тукмаков, Д. А. Тукмаков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2024. – Т. 17. – № 4. – С. 66-81.
17. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2 / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
18. Ковеня, В. М. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики / В. М. Ковеня, Г. А. Тарнавский, С. Г. Черный. – Новосибирск: Наука, 1990. – 247 с.
19. Музафаров, И. Ф. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа / И. Ф. Музафаров, С. В. Утюжников // Математическое моделирование. – 1993. – Т. 5. – № 3. – С. 74-83.
20. Тукмаков, А. Л. Численное моделирование акустических течений при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе / А. Л. Тукмаков // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2006. – № 4. – С. 33-36.



Ермаков С. Г., Забродин А. В., Костин М. А.
S. G. Yermakov, A. V. Zabrodin, M. A. Kostin

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА БЛУМА ДЛЯ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

APPLICATION OF THE DYNAMIC BLOOM FILTER FOR PROCESSING BIG DATA IN REAL-TIME SYSTEMS

Ермаков Сергей Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика и вычислительная техника» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: Ermakov@pgups.ru.

Sergey G. Yermakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Computer Science and Computer Engineering», Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Russia, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave. E-mail: Ermakov@pgups.ru.

Забродин Андрей Владимирович – кандидат исторических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: Zabrodin@pgups.ru.

Andrej V. Zabrodin – PhD in History, Associate Professor, Computer Science and Computer Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Russia, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave. E-mail: Zabrodin@pgups.ru.

Костин Максим Андреевич – студент 3-го курса Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: m.kkoston@yandex.ru.

Maksim A. Kostin – 3rd Year Student, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Russia, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave. E-mail: m.kkoston@yandex.ru.

Аннотация. В современных системах реального времени существует потребность в эффективных алгоритмах обработки больших данных с минимальным временем отклика. Целью исследования являлась разработка модифицированного динамического фильтра Блума, обеспечивающего оптимальный баланс между скоростью, точностью и потреблением памяти. Основной гипотезой выступало предположение о возможности создания вероятностной структуры данных, сохраняющей константное время поиска при динамическом изменении параметров. Для достижения поставленной цели были сформулированы задачи: разработать алгоритм автоматического подбора размера фильтра и числа хеш-функций, реализовать математическую модель и проверить её эффективность на реальных данных. Методология работы основана на вероятностных подходах и экспериментальном тестировании с использованием MurmurHash32 и простых хеш-функций. Экспериментальные исследования показали, что предложенная реализация динамического фильтра Блума обеспечивает высокую производительность при обработке больших наборов данных с переменной структурой, минимизируя вероятность ложноположительных срабатываний и оптимизируя использование памяти.

Summary. In modern real-time systems, there is a need for efficient algorithms for processing big data with minimal response time. The aim of the study was to develop a modified dynamic Bloom filter that provides an optimal balance between speed, accuracy, and memory consumption. The main hypothesis was the possibility of creating a probabilistic data structure that preserves constant search time with dynamic parameter changes. To achieve this goal, the tasks were formulated: to develop an algorithm for automatically selecting the filter size and the number of hash functions, to implement a mathematical model and test its effectiveness on real data. The methodology of the work is based on probabilistic approaches and experimental testing using MurmurHash32 and simple hash functions. Experimental studies have shown that the proposed implementation of the dynamic Bloom filter provides high performance when processing large datasets with variable structure, minimizing the likelihood of false positives and optimizing memory usage.

Ключевые слова: функция, хеширование, класс, переменная, структура данных, битовый массив, аналитика данных, большие данные, минимизация, оптимизация данных, вероятностные структуры данных.

Key words: function, hashing, class, variable, data structure, bit array, data analysis, big data, minimization, data optimization, probabilistic data structures.

УДК 004.041:004.056

Введение. Темой исследования является разработка динамической структуры данных на основе фильтра Блума для быстрого определения принадлежности элемента к множеству с минимальным временем отклика. Вероятностные структуры данных, такие как фильтр Блума, благодаря своей простоте и эффективности широко применяются для проверки принадлежности элементов. Однако классическая версия фильтра Блума имеет ограничения: фиксированный размер структуры и низкую адаптивность к динамическим данным. В данной работе предпринята попытка преодолеть указанные ограничения путём создания динамической структуры данных, которая способна автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям. Это достигается за счёт реализации алгоритма, который позволяет фильтру эффективно перераспределять память и настраивать параметры, такие как количество хеш-функций, в зависимости от объёма и свойств данных. Работа концентрируется на теоретическом обосновании и практической реализации предложенного подхода. Теоретическая значимость исследования заключается в разработке новой математической модели, которая служит основой для функционирования динамической структуры данных. Практическая значимость работы заключается в тестировании реализованного алгоритма на реальных данных, что позволяет оценить его эффективность при обработке больших массивов информации. Полученные результаты подтверждают пригодность фильтра для решения задач анализа сетевых данных, мониторинга и оптимизации процессов. В частности, фильтр может быть успешно использован в таких областях, как сетевой мониторинг на железных дорогах, обнаружение аномалий и сбоев в системах транспорта в режиме реального времени, благодаря эффективному использованию памяти и минимальному времени отклика. Теоретическая значимость работы заключается в формировании новой математической модели, которая будет являться основой для работы структуры данных. Практическая значимость разрабатываемого динамического фильтра Блума состоит в широкой возможности применения в различных областях, включая сетевой мониторинг на железных дорогах, обнаружение аномалий, сбоев в системе работы транспорта в режиме реального времени за счёт эффективного использования памяти и небольшого времени отклика.

Фильтр Блума – одна из множества вероятностных структур данных, позволяющих незамедлительно проверять принадлежность элемента к множеству данных. Существует возможность получения ложноположительного срабатывания – получения сообщения о наличии элемента во множестве при его фактическом отсутствии. Динамический фильтр Блума, рассматриваемый в статье, представляет собой изменённую реализацию классического фильтра Блума. Главными особенностями новой структуры данных являются: автоматическое определение оптимальной ёмкости фильтра (битового массива), благодаря которому динамический фильтр может адаптироваться к любому количеству элементов, которые нужно поместить в него; выбор оптимального количества хеш-функций, которые необходимы для минимизации вероятности ложноположительного срабатывания, но при этом не влияют на скорость проверки принадлежности элемента; оптимизация использования памяти в связи с использованием минимального количества битов.

Математическая модель алгоритма. Пусть размер битового массива m , а k – количество хеш-функций

$$p(h_i(x) \neq j) = 1 - \frac{1}{m}, \quad (1)$$

где $h_i(x) \neq j$ – вероятность того, что j -й бит останется нулевым после применения i -й хеш-функции.

Вероятность события (обозначим событие A), что в j -й бит не будет записана единица i -й хеш-функцией при вставке очередного элемента, рассчитывается по формуле (1) [1, 109]. При этом следует отметить, что событие A можно считать локальным, т. к. оно связано с каждым конкретным элементом и хеш-функцией.

Для упрощения анализа можно предположить, что значения хеш-функций – это независимые случайные величины. Вероятность того, что j -й бит останется нулевым после добавления очередного элемента и применения всех k хеш-функций, определится по формуле

$$p(h_i(x) \neq j, \forall i \in \{1, k\}) = \left(1 - \frac{1}{m}\right)^k, \quad (2)$$

где $p(h_i(x) \neq j, \forall i \in \{1, k\})$ – вероятность того, что j -й бит не будет установлен в 1 после применения всех k хеш-функций.

Следует отметить, что предположение о независимости хеш-функций является упрощением в рамках нашего исследования, которое значительно облегчает анализ и вычисления. В реальных условиях это допущение может быть не всегда справедливо, поскольку хеш-функции могут быть зависимыми, что, в свою очередь, потребует более сложных моделей для оценки [8].

После вставки n различных элементов в пустой фильтр вероятность того, что j -й бит будет равен нулю (обозначим как событие B) при использовании k хеш-функций, рассчитывается по формуле [1, 111]

$$p(B) = \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{kn}. \quad (3)$$

Событие B можно считать глобальным, т. к. оно описывает вероятность для всего множества элементов, вставляемых в фильтр.

Здесь важно отметить, что прямое использование выражения (3) может быть не совсем удобным для практических вычислений, особенно при больших значениях m и n , вследствие того, что оно быстро становится громоздким и сложным для дальнейшего анализа. Для упрощения расчётов в случае, когда размер хеш-таблицы m достаточно велик, можно воспользоваться приближением с использованием второго замечательного предела. Это позволяет выразить вероятность более простым способом, заменив сложную степень на экспоненциальную функцию, в результате мы получим формулу

$$\left(1 - \frac{1}{m}\right)^{kn} \approx e^{\frac{-kn}{m}}. \quad (4)$$

Приведённая формула (4) предоставляет более удобную форму для вычислений и анализа при больших значениях m и n . Опираясь на полученную вероятность, рассмотрим ложноположительное срабатывание – ситуацию, когда фильтр ошибочно утверждает, что элемент присутствует, хотя на самом деле он не был добавлен. Ложноположительное срабатывание произойдёт тогда, когда для несуществующего элемента все k бит окажутся ненулевыми и фильтр Блума ответит, что он входит в число вставленных элементов. Вероятность такого события будет определяться по формуле

$$p(C) = \left(1 - e^{\frac{-kn}{m}}\right)^k. \quad (5)$$

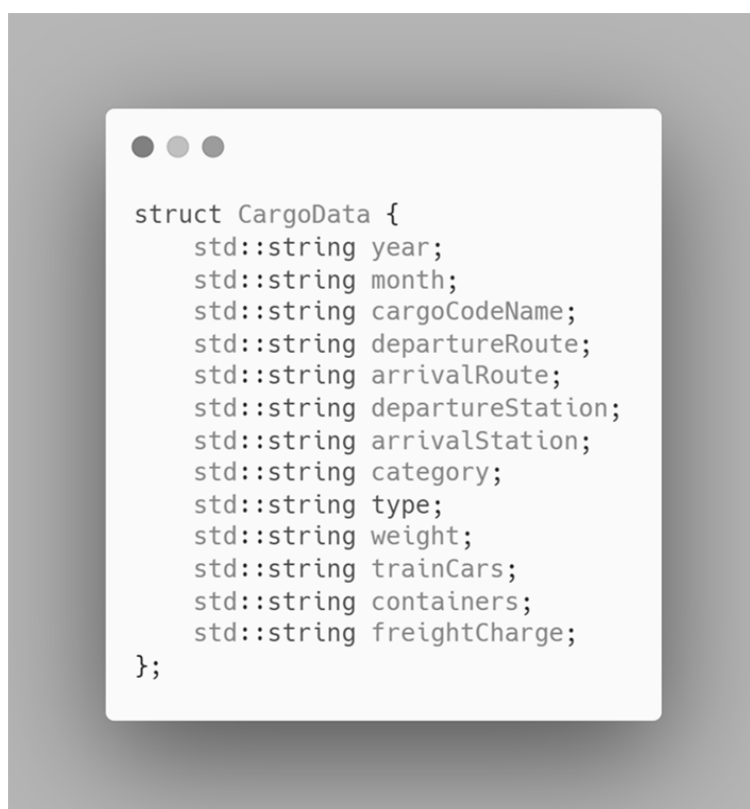
Оптимальный размер динамического фильтра Блума m определяется исходя из количества элементов n и желаемой вероятности ложноположительного срабатывания p :

$$m = \frac{-n * \ln p}{(\ln 2)^2}. \quad (6)$$

На основе полученного значения m оптимальное количество хеш-функций k рассчитывается по формуле (6) так, чтобы минимизировать вероятность ложноположительных срабатываний [2, 171]. В программной реализации эти вычисления выполняются в конструкторе.

$$k = \frac{m}{n} \ln 2 \approx 0.6931 \frac{m}{n}. \quad (7)$$

Апробация математической модели фильтра Блума проводилась на реальных данных, что позволило оценить практическую применимость и точность алгоритма в условиях, приближённых к реальным. Тестирование работы алгоритма проводилось на данных, отражающих деятельность транспортной инфраструктуры. На рис. 1 представлена структура данных, которая будет хранить одну запись из обрабатываемого массива. Таким образом, фильтр Блума должен в качестве элемента получать набор таких строк, формировать для них индексы и записывать в битовый массив. После записи всех строк происходит проверка наличия одной заданной заранее записи.

A screenshot of a code editor window with a light gray background. The window has three small circular window control buttons (red, yellow, green) in the top-left corner. The code is written in C++ and defines a struct named 'CargoData'. The struct contains several string members, each prefixed with 'std::string'. The code is as follows:

```
struct CargoData {  
    std::string year;  
    std::string month;  
    std::string cargoCodeName;  
    std::string departureRoute;  
    std::string arrivalRoute;  
    std::string departureStation;  
    std::string arrivalStation;  
    std::string category;  
    std::string type;  
    std::string weight;  
    std::string trainCars;  
    std::string containers;  
    std::string freightCharge;  
};
```

Рис. 1. Структура для хранения записей из .csv-таблиц отчётов

Вычисления по формулам (1) – (7) производятся в конструкторе динамического фильтра Блума. Основа структуры данных, необходимой для решения поставленной проблемы, это класс, содержащий конструктор и необходимые поля для хранения битового массива с индексами, массива хеш-функций, необходимых для получения индексов, а также словарь для отслеживания коллизий [3, 129]. Под коллизией подразумевается случай совпадения индексов для некоторых элементов в битовом массиве. Подробно структуры для хранения вышеперечисленных инструментов показаны на рис. 2.

Одна из главных хеш-функций, применённых в реализации структуры данных, это «MurmurHash». Так как MurmurHash очень быстрый алгоритм хеширования, он очень важен для эффективной работы фильтра Блума. MurmurHash обеспечивает хорошее равномерное распределение хеш-значений, что снижает вероятность коллизий в фильтре Блума. К тому же алгоритм хеш-функции оптимизирован для эффективного использования памяти, что важно для больших фильтров Блума [8]. Пример программной реализации алгоритма MurmurHash32 приведён на рис. 3.

```

class DynBloomFilter
{
private:
    std::vector<bool> data; //битовый массив
    std::vector<std::function<size_t(const std::string&)>> hashFunctions; //вектор хеш-функций
    std::unordered_map<size_t, size_t> collisionMap; // Для подсчета коллизий
    std::unordered_map<std::string, std::vector<size_t>> elementIndices; // Для отслеживания индексов
    элементов и абсолютных коллизий

    int hash_f_counter;
    size_t size;

    void resetBit(size_t index)
    {
        if (index < data.size())
        {
            data[index] = false;
            collisionMap[index]--;
        }
    }

public:
    DynBloomFilter(int numElements, double falsePositiveRate)
    {
        size_t m = static_cast<size_t>((-numElements * log(falsePositiveRate) / (log(2) * log(2))));

        int k = static_cast<int>(std::log(2) * m / numElements);

        // Динамическое увеличение размера
        data.resize(m, 0);

        //Добавление хеш-функций

        for (int i = 0; i < k; ++i)
        {
            if (i == 0)
            {
                addHashFunction([this](const std::string& name) { return this->hashFunction1(name); });
            }
            else if (i == 1)
            {
                addHashFunction([this](const std::string& name) { return this->hashFunction2(name); });
            }
            else if (i == 2)
            {
                addHashFunction([this](const std::string& name) { return this->murmurHash(name); });
            }
            else if (i > 2)
            {
                auto hashFunction = [i](const std::string& name) {
                    return std::hash<std::string>{}(name)+i;
                };
                addHashFunction(hashFunction);
            }
        }
    }
}

```

Рис. 2. Поля структуры данных «Динамический фильтр Блума» и конструктор с вычислениями

Отличительная черта динамического фильтра Блума, которая полезна для его использования в сложных серверных системах реального времени или для работы с большими данными, это выполнение проверки принадлежности элемента к множеству за $O(1)$, следовательно, эффективность этой операции не зависит от количества данных и размера фильтра Блума, что обеспечивается работой нескольких хеш-функций, распределяющих индексы по битовому массиву (см. рис. 4), где $\{x, y, z\}$ – входные данные, которым по хеш-функциям предоставляются индексы в битовом массиве, причём каждый элемент получит 3 индекса, т. к. используются 3 хеш-функции, и элемент w , наличие которого проверяется.

```
uint32_t murmur3_32(const std::string& myString, uint32_t len, uint32_t seed)
{
    const char* key = myString.c_str();

    static const uint32_t c1 = 0xcc9e2d51;
    static const uint32_t c2 = 0x1b873593;
    static const uint32_t r1 = 15;
    static const uint32_t r2 = 13;
    static const uint32_t m = 5;
    static const uint32_t n = 0xe6546b64;

    uint32_t hash = seed;

    const int nblocks = len / 4;
    const uint32_t* blocks = (const uint32_t*)key;
    int i;
    for (i = 0; i < nblocks; i++) {
        uint32_t k = blocks[i];
        k *= c1;
        k = (k << r1) | (k >> (32 - r1));
        k *= c2;

        hash ^= k;
        hash = ((hash << r2) | (hash >> (32 - r2))) * m + n;
    }

    const uint8_t* tail = (const uint8_t*)(key + nblocks * 4);
    uint32_t k1 = 0;

    switch (len & 3) {
    case 3:
        k1 ^= tail[2] << 16;
    case 2:
        k1 ^= tail[1] << 8;
    case 1:
        k1 ^= tail[0];

        k1 *= c1;
        k1 = (k1 << r1) | (k1 >> (32 - r1));
        k1 *= c2;
        hash ^= k1;
    }

    hash ^= len;
    hash ^= (hash >> 16);
    hash *= 0x85ebca6b;
    hash ^= (hash >> 13);
    hash *= 0xc2b2ae35;
    hash ^= (hash >> 16);

    return hash;
}

// Адаптированная функция хеширования MurmurHash для использования в BloomFilter
size_t murmurHash(const std::string& str) {
    uint32_t len = static_cast<uint32_t>(str.length());
    uint32_t seed = 0;
    uint32_t hash = murmur3_32(str, len, seed);
    return static_cast<size_t>(hash);
}
```

Рис. 3. Реализация MurmurHash32

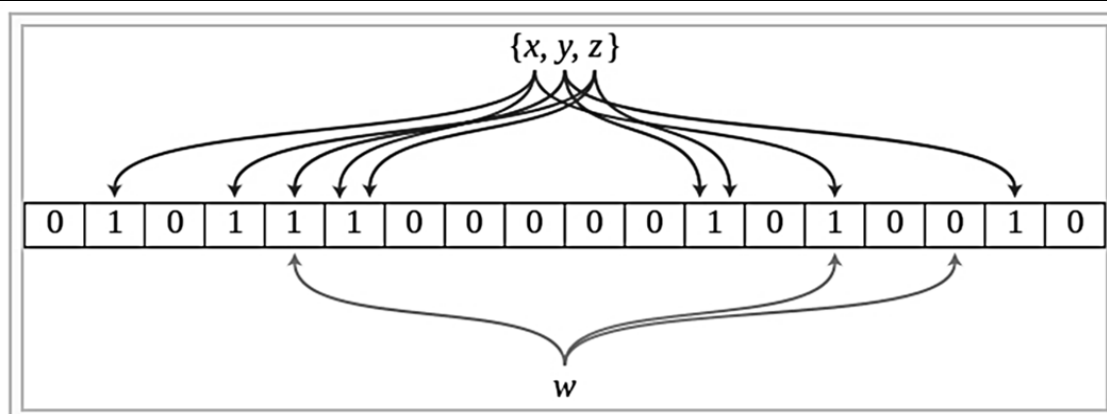


Рис. 4. Пример работы фильтра Блума

В ходе разработки, как было сказано выше, использовалась хеш-функция MurmurHash32, а также 2 простые хеш-функции на основе простых чисел (см. рис. 5).

```

1  size_t hashFunction1(const std::string& str)
2  {
3      size_t hash = 0;
4      for (char c : str) {
5          hash = hash * 31 + c; // Пример хэш-функции для строки
6      }
7      return hash;
8  }
9
10 size_t hashFunction2(const std::string& str) {
11     size_t hash = 0;
12     for (char c : str) {
13         hash = hash * 37 + c;
14     }
15     return hash;
16 }
```

Рис. 5. Реализация хеш-функции с использованием простых чисел

Количество хеш-функций в фильтре Блума определяет его эффективность: увеличение их числа снижает вероятность ложноположительных срабатываний, но одновременно возрастает вычислительная нагрузка [5, 376]. Поэтому в рамках предлагаемого исследования одним из ключевых усовершенствований стала возможность гибко изменять количество хеш-функций по мере необходимости. Для этого в конструкторе (см. рис. 2) задействованы лямбда-функция и стандартный метод хеширования, позволяющие при необходимости добавлять новые хеш-функции и, как следствие, поддерживать оптимальный баланс между точностью и производительностью. Для тестирования динамического фильтра Блума были использованы данные, извлечённые из электронных таблиц с широким набором операционных параметров (уникальные идентификаторы, числовые характеристики, коды локаций и т. д.) и отражающие реальные процессы. Многообразие

этих полей не влияет на работоспособность структуры, поскольку предметная область не накладывает ограничений на внутренние механизмы фильтра. На рис. 6 показан результат процесса поиска одной из записей в первом наборе данных (были использованы пять таблиц, каждая содержит около миллиона записей). В консоли выводится общий объем занимаемой памяти (включая битовый массив и хеш-функции), число хеш-функций, а также результат проверки на наличие тестируемой записи. Полученные данные подтверждают способность фильтра эффективно обнаруживать заданную запись, что свидетельствует о правильности его функционирования при заданных условиях.

```
Size DFB =9585058
HF count: 3
1000001
Cargo data exists: Yes
1000001
Cargo data exists: No
1000001
Cargo data exists: No
1000001
Cargo data exists: No
1000001
Cargo data exists: No
Время выполнения алгоритма: 35 секунд
Размер объекта DynBloomFilter: 192 байт
```

Рис. 6. Результат работы алгоритма на 5 миллионах записей
с проверкой принадлежности записи после обработки каждой таблицы

Исследование времени работы метода для проверки принадлежности записи к общему множеству показало, что этот показатель практически не изменяется при увеличении исходного набора с одного до пяти миллионов записей. Результаты, выводимые в консоль, свидетельствуют о том, что длительность поиска в битовом массиве не зависит ни от размера самого массива, ни от общего объема обработанных данных [6, 18].

Динамический фильтр Блума, как и классическая модель фильтра, позволяет интерпретировать любые данные как битовый массив [7, 52], обеспечивая тем самым практически мгновенный поиск при наличии некоторой вероятности ложноположительных срабатываний. Благодаря индексации и эффективному поиску в больших наборах данных, где точное количество элементов неизвестно заранее, динамический фильтр Блума может успешно применяться при мониторинге систем и сетевого трафика (к примеру, для отслеживания уникальных доменов или запросов в реальном времени), при анализе логов для выявления уникальных ошибок при работе сервера, а также в рекомендательных системах, где необходимо быстро определить уникальные элементы пользовательской деятельности. Динамический фильтр Блума особенно полезен там, где требуется баланс между скоростью и точностью и при этом невозможно точно предсказать объем обрабатываемых данных заранее. Способность автоматически адаптироваться к изменениям в данных делает динамический фильтр Блума универсальным инструментом для обработки неструктурированных или эволюционирующих наборов данных.

Выводы. При разработке динамического фильтра Блума был реализован механизм вычисления необходимого числа хеш-функций для минимизации коллизий и устранения эффекта ложноположительного срабатывания. Динамический фильтр Блума демонстрирует значительные



преимущества в обработке больших данных в системах реального времени, обеспечивая баланс между скоростью, точностью и эффективностью использования ресурсов. Предложенное решение имеет потенциал стать мощным инструментом в современных системах анализа данных и обработки информации в режиме реального времени. В ходе исследования были выполнены главные критерии для использования динамического фильтра Блума в системах реального времени – константное время выполнения поиска элемента при динамически подобранных параметрах (размер фильтра Блума и количество хеш-функций).

ЛИТЕРАТУРА

1. Demetrescu C. Experimental Algorithms: Proceedings of the International Workshop on Experimental Algorithms – 2007. Algorithm Engineering Research Collection. Rome: La Sapienza University, 2007. – 458 p.
2. Patgiri R., Nayak S., Muppalaneni N. B. Bloom Filter: A Data Structure for Networking, Big Data, Machine Learning, Cloud Computing, Internet of Things, Bioinformatics, and Beyond. 1st ed. Cambridge: Academic Press, 2023. – 228 p.
3. Рафгарден, Т. Совершенный алгоритм. Графовые алгоритмы и структуры данных / Т. Рафгарден. – СПб.: Питер, 2019. – 256 с.
4. Burton B. H. Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors // Communications of the ACM T. – 1970. – Vol. 13. – No. 7. – P. 426.
5. Fan L., Cao P., Almeida J., Broder A. Summary cache: A scalable wide-area Web cache sharing protocol // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2000. – Vol. 8. – No. 3. – P. 281-293.
6. Zhang Y., Wu Y. and Yang G. Droplet: A distributed solution of data deduplication // ACM/IEEE 13th International Conference on Grid Computing. – 2012. – P. 114-121.
7. Patgiri R., Nayak S., Borgohain S. K. Role of Bloom Filter in Big Data Research: A Survey // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). – 2018.– Vol. 9. – No 11. – P. 650-658.
8. Сайт конспектов лекций университета ИТМО: сайт. – Санкт-Петербург, 2023. – URL: <https://neerc.ifmo.ru> (дата обращения: 21.04.2024). – Текст: электронный.

Носков С. И., Беляев С. В.
S. I. Noskov, S. V. Belyaev

АНТИРОБАСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЛАСТЕРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

ANTI-ROBUST ESTIMATION OF CLUSTER LINEAR REGRESSION PARAMETERS

Носков Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Sergey I. Noskov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Беляев Сергей Вячеславович – магистрант кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: bsv2001@list.ru.

Sergey V. Belyaev – Master's Degree Student, Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: bsv2001@list.ru.

Аннотация. В статье дан краткий обзор публикаций по кластеризации обрабатываемой информации при математическом моделировании сложных систем. В частности, рассмотрены: применение нечёткой логики для представления параметров управления газовой турбиной на основе метода нечёткой кластеризации с использованием алгоритмов Густафсона – Кесселя, некоторые результаты по иерархическому представлению изображений в рамках математической морфологии, математическая модель компоновки кластерных коллекторов в системе подводной добычи, вычислительная схема решения зависящей от расстояния проблемы кластеризации перегруппировки, структура трёхсторонней кластеризации на основе сжатия и расширения, алгоритм иерархической кластеризации текстовой информации. Разработан алгоритмический способ сведения задачи антиробастного оценивания параметров кластерной линейной регрессионной модели, состоящей в минимизации максимальной ошибки аппроксимации, к задаче линейно-булева программирования. Сформированы две версии кластерной линейной регрессионной модели активной мощности гидроагрегата одной из ГЭС Сибири. В качестве независимых переменных использованы: реактивная мощность, напряжение статора, ток ротора и статора, температура горячего воздуха воздухоохладителя. Проведён краткий анализ этих версий.

Summary. The article provides a brief overview of publications on clustering of processed information in mathematical modeling of complex systems. In particular, the following are considered: application of fuzzy logic for representing gas turbine control parameters based on the fuzzy clustering method using the Gustafson–Kessel algorithms, some results on the hierarchical representation of images within the framework of mathematical morphology, a mathematical model for arranging cluster collectors in an underwater production system, a computational scheme for solving a distance-dependent rearrangement clustering problem, a structure of three-way clustering based on compression and expansion, an algorithm for hierarchical clustering of text information. An algorithmic method for reducing the problem of antirobust estimation of the parameters of a cluster linear regression model, consisting in minimizing the maximum approximation error, to a linear Boolean programming problem has been developed. Two versions of the cluster linear regression model of the active power of a hydroelectric unit of one of the Siberian hydroelectric power plants have been formed. The following independent variables were used: reactive power, stator voltage, rotor and stator current, air cooler hot air temperature. A brief analysis of these versions was carried out.

Ключевые слова: регрессионная модель, кластерная регрессия, задача линейно-булева программирования, активная мощность гидроагрегата.

Key words: regression model, cluster regression, linear Boolean programming problem, active power of a hydroelectric unit.

УДК 330.4

Введение. При исследовании методами математического моделирования сложных систем может возникнуть необходимость в кластеризации обрабатываемой информации, её разбиении на относительно однородные группы наблюдений. Так, в работе [1] предлагаются математические программные формулировки и методы эффективного решения проблемы кластеризации дискретных k -медиан. Разработаны алгоритмы аппроксимации для билинейной формулировки дискретной k -медианной задачи с использованием несвязанного билинейного программного алгоритма. Этот алгоритм состоит из двух чередующихся линейных программ, где одна может быть решена за линейное время, а другая является задачей назначения минимальной стоимости. В статье [2] для решения задач кластеризации описывается использование недавно предложенного метаэвристического алгоритма оптимизации, который имитирует стратегии симбиотического взаимодействия, принятые организмами для выживания и размножения в экосистеме. В [3] изучается применение нечёткой логики для представления параметров управления газовой турбиной на основе метода нечёткой кластеризации с использованием алгоритмов Густафсона – Кесселя. В публикации [4] рассмотрены фундаментальные результаты по иерархической кластеризации, а также недавние парадигмы, разработанные для иерархического представления изображений в рамках математической морфологии: ограниченная связность и ультраметрические водоразделы. Ограниченную связность можно рассматривать как способ ограничения исходной иерархии таким образом, чтобы был удовлетворён набор желаемых ограничений. Структура ультраметрических водоразделов обеспечивает общую схему для вычисления любой иерархической связанной кластеризации, в частности, когда такая иерархия ограничена. Исследование [5] посвящено разработке математической модели компоновки кластерных коллекторов в системе подводной добычи, что значительно влияет на эффективность, безопасность и стоимость разработки глубоководных нефтяных и газовых месторождений.

В статье [6] для указания иерархий кластеров в панельных данных предлагается усовершенствованный метод анализа серой кластеризации, основанный на последовательностях накопления с использованием реляционного анализа. Метод кластеризации может обрабатывать панельные данные, содержащие N образцов, каждый из которых имеет m временных рядов индикаторов, для которых наблюдения по данному временному ряду могут быть измерены в разное время, чем другие ряды, и содержат разное количество точек данных по сравнению с другими рядами. В [7] представлена вычислительная схема решения проблемы кластеризации перегруппировки, зависящей от расстояния, с использованием смешанного целочисленного линейного программирования. Для решения проблемы разреженных наборов данных использована целевая функция для оценки парных взаимодействий между двумя элементами как функция расстояния между ними в конечном порядке. В работе [8] путём объединения идеи эрозии и некоторых принципов математической морфологии предлагается структура трёхсторонней кластеризации на основе сжатия и расширения, называемая CE3. Трёхсторонний кластер определяется вложенной парой множеств, называемых ядром и поддержкой кластера соответственно. В публикации [9] проблема формирования кластеров и интерпретаций, оптимизирующих совместную меру однородности, точности и отличительности, формулируется как многоцелевая задача смешанной целочисленной линейной оптимизации, на основе которой генерируются недоминируемые решения.

Идентификация параметров кластерной линейной регрессии путём минимизации максимальной ошибки аппроксимации. Рассмотрим кластерную линейную регрессию (КЛР):

$$y_k = \alpha_0^j + \sum_{i=1}^m \alpha_i^j x_{ki} + \varepsilon_k^j, \quad j = \overline{1, r}, k \in P^j, \quad (1)$$

где y – зависимая (выходная), а $x_i, i = \overline{1, m}$ – независимые (входные) переменные, r – заданное число кластеров, $\{1, 2, \dots, n\} \supset P^j$ – множество номеров наблюдений в j -м кластере. При этом выполняются условия:

$$\bigcup_{j=1}^r P^j = \{1, 2, \dots, n\}, \quad P^i \cap P^j = \emptyset, \quad i \neq j.$$

Задача состоит в идентификации параметров $\alpha_i^j, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, r}$ и построении индексных множеств $P^j, j = \overline{1, r}$. Она решается (см., например, [10]) путём решения задачи оптимизации:

$$G_\rho(A, \Xi) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^r \sigma_{kj} |\varepsilon_k^j|^\rho \rightarrow \min, \quad \rho > 0, \quad (2)$$

где

$$\sigma_{kj} = \begin{cases} 1, & k \in P^j \\ 0, & k \notin P^j \end{cases},$$

$$A = \|\alpha_i^j\|, \quad j = \overline{1, r}, \quad i = \overline{0, m}, \quad \Xi = \|\sigma_{kj}\|, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}.$$

Задача (2) при $\rho = 1$ может быть сведена (см., в частности, [11; 12]) к следующей задаче линейно-булева программирования (ЛБП):

$$\alpha_0^j + \sum_{i=1}^m \alpha_i^j x_{ki} - M \sigma_{kj} + u_k \geq y_k - M, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$\alpha_0^j + \sum_{i=1}^m \alpha_i^j x_{ki} + M \sigma_{kj} - u_k \leq y_k + M, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^r \sigma_{kj} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$\sigma_{kj} \in \{0, 1\}, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (6)$$

$$u_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^n u_k \rightarrow \min, \quad (8)$$

где M – наперёд заданное большое положительное число.

При $\rho \rightarrow \infty$ в (2) речь может идти об антиробастном оценивании параметров КЛР (1) (см., например, [13, 177; 14]), приводящем в этом случае к задаче

$$G_\infty(A, \Xi) = \max_{\substack{k=\overline{1, n}, \\ j=\overline{1, r}}} \sigma_{kj} |\varepsilon_k^j| \rightarrow \min. \quad (9)$$

Задача (9) также сводится к задаче ЛБП, если воспользоваться соответствующими приёмами [14–17].

Действительно, введём в рассмотрение вещественную переменную $z > 0$ следующим образом:

$$z = \min \max_{\substack{k=\overline{1, n}, \\ j=\overline{1, r}}} \sigma_{kj} |\varepsilon_k^j|.$$

Тогда задача (9) сводится к задаче ЛБП с ограничениями (3) – (7)

$$u_k < z, \quad k = \overline{1, n} \quad (10)$$

и целевой функцией

$$z \rightarrow \min. \quad (11)$$

Кластерная линейная регрессия активной мощности гидроагрегата. Применим описанный выше подход для построения КЛР активной мощности гидроагрегата одной из гидроэлектростанций (ГЭС) Сибири на основе использования соответствующих данных [18].

Введём следующие обозначения: y – активная мощность, МВт; x_1 – реактивная мощность, Вт; x_2 – напряжение статора, В; x_3 – ток ротора, А; x_4 – ток статора, А; x_5 – температура горячего воздуха воздухоохладителя, °С.

Вначале построим обычную КЛМ путём решения задачи (2) с $\rho = 1$, $r = 2$ с помощью задачи ЛБП (3) – (8). В результате получим модель:

$$y_k = -481.1 - 2.44x_{k1} - 12.49x_{k2} + 633.5x_{k3} - 0.32x_{k4} + 0.009x_{k5} + \varepsilon_k, k \in P^1, \quad (12)$$

$$P^1 = \{1, 2, 4, 5, 7, 11, 12, 13, 17, 20\},$$

$$y_k = -320.3 - 0.92x_{k1} + 7.6x_{k2} + 112x_{k3} + 32.2x_{k4} + 0.27x_{k5} + \varepsilon_k, k \in P^2, \quad (13)$$

$$P^2 = \{3, 6, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 18, 19\},$$

$$G_1 = 1.77, G_\infty = 0.68.$$

Затем построим КЛР методом антиробастного оценивания параметров путём решения задачи (9) с помощью задачи ЛБП (3) – (7), (10), (11). В результате получим

$$y_k = -400.6 - 2.46x_{k1} - 18.4x_{k2} + 636.7x_{k3} + 0.21x_{k4} + 0.27x_{k5} + \varepsilon_k, k \in P^1, \quad (14)$$

$$P^1 = \{1, 2, 4, 5, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19\},$$

$$y_k = -295.4 - 2.46x_{k1} - 1.01x_{k2} + 161.4x_{k3} + 30x_{k4} + 0.26x_{k5} + \varepsilon_k, k \in P^2, \quad (15)$$

$$P^2 = \{3, 6, 8, 9, 10, 16, 18, 20\},$$

$$G_1 = 4.52, G_\infty = 0.23.$$

Анализ КЛР (12), (13) и (14), (15) позволяет сделать следующие выводы:

1. Оценки параметров всех четырёх частных регрессий существенно различаются, иногда вплоть до знаков.
2. Если число элементов в индексных множествах P^1 и P^2 в КЛР (12), (13) совпадает, то в КЛР (14), (15) мощность множества P^1 на 4 больше, чем мощность множества P^2 .
3. Сумма модулей ошибок в КЛР (12), (13) в 2.55 раза меньше, чем в КЛР (14), (15), однако максимальная ошибка в КЛР (14), (15) в 2.96 раза меньше, чем в КЛР (12), (13), что, впрочем, вполне согласуется со смыслом задач (2) и (9).

Заметим, что предлагаемый способ построения кластерной линейной регрессии может быть использован, в частности, для исследования и других технических объектов (см., в частности, [19; 20]).

Заключение. В работе предложен алгоритмический способ сведения задачи антиробастного оценивания параметров кластерной линейной регрессии, заключающейся в минимизации максимальной ошибки аппроксимации, к задаче линейно-булева программирования. Построены два варианта кластерной линейной регрессионной модели активной мощности гидроагрегата одной из ГЭС Сибири: путём минимизации суммы модулей ошибок и максимальной ошибки. Проведён краткий анализ этих вариантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Onur Seref, Ya-Ju Fan, Wanpracha Art Chaovalitwongse. Mathematical Programming Formulations and Algorithms for Discrete k-Median Clustering of Time-Series Data // *INFORMS Journal on Computing*. – 2013. – Vol. 26. – No. 1. – P. 160-172.
2. Yongquan Zhou, Haizhou Wu, Qifang Luo, Mohamed Abdel-Baset. Automatic data clustering using nature-inspired symbiotic organism search algorithm // *Knowledge-Based Systems*. – 2019. – Vol. 163. – P. 546-557.
3. Abdelhafid Benyounes, Ahmed Hafaifa & Mouloud Guemana. Gas Turbine Modeling Based on Fuzzy Clustering Algorithm Using Experimental Data // *Applied Artificial Intelligence*. – 2016. – Vol. 30. – No. 1. – P. 29-51.
4. Pierre Soille & Laurent Najman. On Morphological Hierarchical Representations for Image Processing and Spatial Data Clustering // *Applications of Discrete Geometry and Mathematical Morphology* (Istanbul, 12.08.2010). – Istanbul, 2010. – P. 43-67.

5. Yingying Wang, Menglan Duan, Minghua Xu, Deguo Wang, Wei Feng. A mathematical model for subsea wells partition in the layout of cluster manifolds // *Applied Ocean Research*. 2012. – Vol. 36. – P. 26-35.
6. Xuemei Li, Keith W. Hipel, Yaoguo Dang. An improved grey relational analysis approach for panel data clustering. *Expert Systems with Applications*. – 2015. – Vol. 42. – No. 23. – P. 9105-9116.
7. Scott R. McAllister, Peter A. DiMaggio Jr. & Christodoulos A. Floudas. Mathematical modeling and efficient optimization methods for the distance-dependent rearrangement clustering problem // *Journal of Global Optimization*. – 2009. – Vol. 45. – P. 111-129.
8. Pingxin Wang, Yiyu Yao. CE3: A three-way clustering method based on mathematical morphology // *Knowledge-Based Systems*. – 2018. – Vol. 155. – P. 54-65.
9. Emilio Carrizosa, Kseniia Kurishchenko, Alfredo Marín, Dolores Romero Morales. On clustering and interpreting with rules by means of mathematical optimization // *Computers & Operations Research*. – 2023. – Vol. 154.
10. Qiang Long, Adil Bagirov, Sona Taheri, Nargiz Sultanova, and Xue Wu. Methods and Applications of Clusterwise Linear Regression: A Survey and Comparison // *ACM Trans. Knowl. Discov. Data*. – 2023. – Vol. 17. – No. 3. – P. 1-54.
11. Dimitris Bertsimas and Romy Shioda. Classification and Regression via Integer Optimization // *Operations Research*. – 2007. – Vol. 55. – P. 252-271.
12. Носков, С. И. Оценка непротиворечивости кластерной линейной регрессионной модели / С. И. Носков, С. В. Беляев // *Вестник Технологического университета*. – 2025. – Т. 28. – № 2. – С. 88-91.
13. Демиденко, Е. З. Линейная и нелинейная регрессии / Е. З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
14. Носков, С. И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределённостью в данных / С. И. Носков. – Иркутск: Облформпечать, 1996. – 320 с.
15. Wagner M. H. Linear programming techniques for regression analysis // *Journal of the American Statistical Association*. – 1959. – Vol. 54. – No. 285. – P. 206-212.
16. Wagner M. H. Non-linear regression with minimal assumptions // *Journal of the American Statistical Association*. – 1962. – Vol. 57. – No. 299. – P. 572-578.
17. Носков, С. И. Метод антиробастного оценивания параметров линейной регрессии: число максимальных по модулю ошибок аппроксимации / С. И. Носков // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2020. – № 1. (29). – С. 51-54.
18. Носков, С. И. Подход к заполнению пропусков в данных о функционировании гидроагрегата / С. И. Носков, В. А. Лисицын // *Инженерный вестник Дона*. – 2024. – № 10 (118). – С. 567-576.
19. Андрианов, И. К. Вариационная задача о суммарных издержках производства и хранения продукции с подвижной правой границей / И. К. Андрианов, Е. К. Чепурнова // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2024. – № I (73). – С. 32-41.
20. Колесник, М. Б. Получение аппроксимирующих зависимостей для учёта влияния параметров нагрузки на энергетические показатели асинхронного двигателя / М. Б. Колесник // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2022. – № III (59). – С. 43-47.



Дмитриева Т. Л., Ботхоев А. Е., Фролов Д. О.
T. L. Dmitrieva, A. E. Botkhoev, D. O. Frolov

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИНСТРУМЕНТАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ MATHCAD**

**SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS OF ROD STRUCTURES USING THE TOOLS
OF THE MATHCAD COMPUTING SYSTEM**

Дмитриева Татьяна Львовна – доктор технических наук, зав. кафедрой механики и сопротивления материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); тел. 8(964)272-78-23. E-mail: dmitrievat@list.ru.

Tatiana L. Dmitrieva – Doctor of Technical Sciences, Head of Mechanic and Strength of Materials Department, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); tel. 8(964)272-78-23. E-mail: dmitrievat@list.ru.

Ботхоев Александр Евгеньевич – аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск). E-mail: botkhoev@ya.ru.

Alexander E. Botkhoev – Postgraduate Student, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk). E-mail: botkhoev@ya.ru.

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Аннотация. Представлен алгоритм оптимизации стальной рамы при действии статической нагрузки, где принята постановка в форме задачи нелинейного программирования. Решение выполнено с использованием инструментов математического пакета Mathcad, что делает алгоритм достаточно прозрачным и позволяет отследить последовательность вычислительных операций. Подбираются параметры сечений элементов рамы, где стойки имеют кольцевое, а ригель двутавровое сечение на заданном интервале (всего 4 параметра). Целевая функция представляет объём рамы. Применён широкий спектр нормативных проверок по прочности и жёсткости. Для решения использован алгоритм модифицированных функций Лагранжа, который продемонстрировал достаточно быструю сходимость алгоритма к оптимальному проекту с высокой точностью в невязках ограничений. Выполнена проверка решения на принадлежность глобальному оптимуму.

Summary. An algorithm for optimizing a steel frame under static load is presented, where the statement is taken as a nonlinear programming problem. The solution is implemented using the tools of the MathCAD mathematical package, which makes the algorithm sufficiently transparent and allows tracking the sequence of computational operations. The parameters of the frame element sections are selected, where the posts have a ring section and the crossbar has an I-beam section at a given interval (4 parameters in total). The objective function represents the frame volume. A wide range of standard strength and rigidity checks is applied. The modified Lagrange function algorithm is used for the solution, which demonstrated a sufficiently fast convergence of the algorithm to the optimal design with high accuracy in constraint residuals. The solution is checked for belonging to the global optimum.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, нелинейное программирование, пакет Mathcad.

Key words: optimal design, nonlinear programming, Mathcad package.

УДК 51-74

Актуальность исследования. В настоящее время большинство инженерных задач, связанных с расчётом и оптимизацией конструкций зданий и сооружений, выполняются автоматизировано. Расчётные комплексы (ПК) инженерного анализа стали общедоступны, а их производительность существенно выросла. За последние 5 лет на рынок программных продуктов в рамках им-

портозамещения стало активно продвигаться множество вычислительных комплексов, таких как САЕ Fidesys, ЛОГОС ПРОЧНОСТЬ, FlowVision и др. [1]. Однако как альтернатива расчётов в универсальных ПК некоторые расчётные алгоритмы могут быть реализованы специалистами с использованием различных программных сред самостоятельно [2–4]. Это в полной мере касается задач оптимального проектирования, поскольку модули оптимизации заявлены во многих ПК, однако достоверность полученных результатов нуждается в проверке [5–7]. Одним из инструментов, позволяющих выполнять реализацию авторских алгоритмов, является функционал математического пакета Mathcad. Программные алгоритмы, формализованные в среде Mathcad, могут быть использованы в проектировании, при решении научных задач, в учебном процессе, а также для верификации аналогичных задач в сертифицированных программных комплексах.

Алгоритм исследования. Алгоритм решения задачи оптимального проектирования приведём на примере рамы, изображённой на рис. 1.

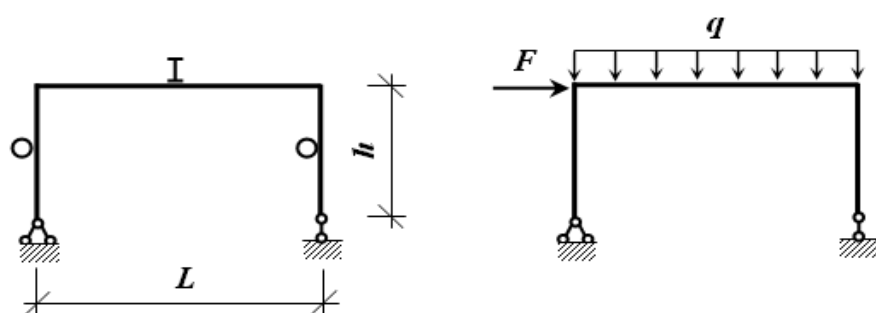


Рис. 1. Геометрия и нагружение плоской стальной рамы

Приняты следующие исходные данные:

- расчётное сопротивление стали по пределу текучести $R_y = 2,25 \cdot 10^5$ кПа;
- расчётное сопротивление стали сдвигу $R_s = 1,25 \cdot 10^5$ кПа;
- модуль упругости $E = 2,06 \cdot 10^8$ кПа;
- геометрия рамы $L = 8$ м, $h = 4$ м;
- нагружение $F = 70$ кН, $q = 80$ кН/м.

Параметры сечений стойки и ригеля показаны на рис. 2 и 3 и в табл. 1.

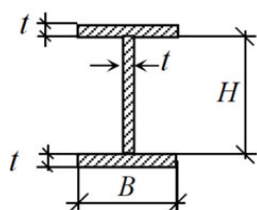


Рис. 2. Сечение ригеля

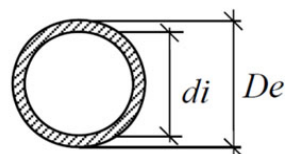


Рис. 3. Сечение стойки

Таблица 1

Варьируемые параметры

Номер параметра	Обозначение	Описание
X_1	H	Высота стенки
X_2	B	Ширина полки
X_3	t	Толщина стенки
X_4	De	Внешний диаметр кольца

Целевая функция $f(x)$ представляет собой объём рамы: $f(x) = A_{rig} \cdot L + 2 \cdot A_{st} \cdot h$.
Все проверки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Перечень проверок

Выражение проверки	Описание
$g_1 = \frac{H}{3,5 \cdot t} \sqrt{\frac{R_y}{E}} - 1 \leq 0$	Условие, обеспечивающее местную устойчивость стенки двутавра
$g_2 = \frac{M_{st}}{W_{st,min} \cdot R_y} + \frac{N_{st}}{A_{st} \cdot R_y} - 1 \leq 0$	Проверка на прочность стойки по нормальным напряжениям
$g_3 = \frac{M_{rig}}{W_c \cdot R_y} - 1 \leq 0$	Проверка на прочность ригеля по нормальным напряжениям
$g_4 = \frac{Q_{rig} \cdot S_{rig}}{J_{rig} \cdot t \cdot R_s} - 1 \leq 0$	Проверка на прочность ригеля по касательным напряжениям
$g_5 = \frac{\Delta_{rig}}{[\Delta_{rig}]} - 1 \leq 0$	Проверка на вертикальное отклонение сечения I ригеля
$g_6 = \frac{\Delta_{st}}{[\Delta_{st}]} - 1 \leq 0$	Проверка на горизонтальное отклонение сечения I ригеля

Алгоритм решения задачи оптимизации рамы. На рис. 4 показана укрупнённая блок-схема алгоритма оптимизации рамы.

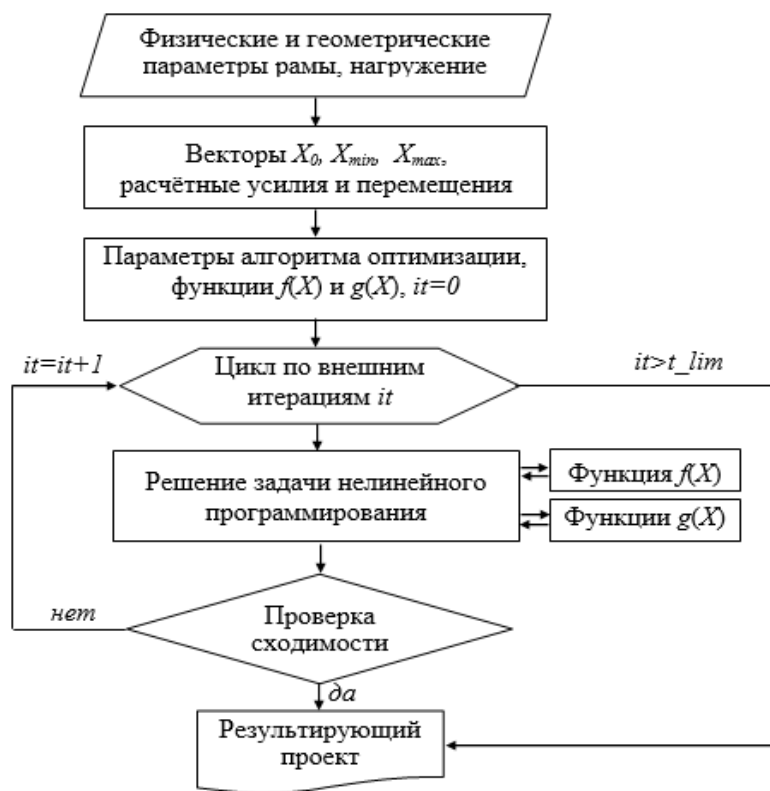


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимального проектирования рамы

Решение задачи выполняется с использованием метода модифицированных функций Лагранжа [8; 9]. Итерационный алгоритм поиска параметров варьирования включает две основные операции: поиск параметров $\{X\}$ путём минимизации функции Fp и пересчёт двойственных переменных $\{Y\}$. На рис. 5 приведена блок-схема последовательности вычислительных операций внутри итераций поискового алгоритма оптимизации.

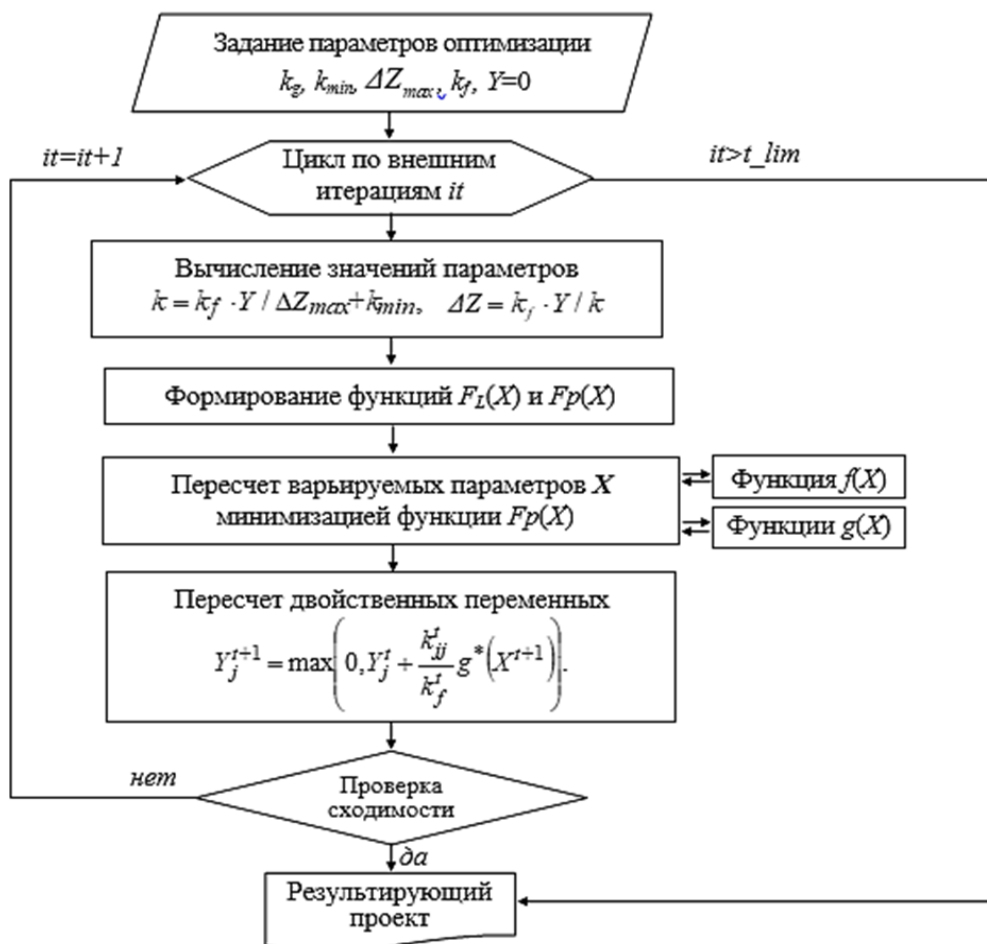


Рис. 5. Блок-схема последовательности вычислительных операций на итерациях

Решение данной задачи в среде Mathcad имеет некоторые особенности:

1. Минимизация функции $Fp(X)$ выполняется методами, заложенными в этот пакет.
2. Автоматический выход из итерационного цикла не представляется возможным и контролируется самим пользователем из условия равенства варьируемых параметров на двух соседних итерациях при условии, что выполнены все требования в функциях ограничений.
3. Вследствие того, что рама статически определима, после переопределения параметров сечений на внешних итерациях не требуется переопределения расчётных усилий в раме, которые вычисляются до входа в итерационный процесс и остаются постоянными на протяжении всего хода вычислений. Таким же образом определяются значения расчётных перемещений без учёта параметров жёсткости.
4. Все параметры варьирования входят в геометрические характеристики сечений, которые включены в функции ограничений (см. табл. 2).

Ниже на рис. 6-9 приведены листинги расчётов в математическом пакете Mathcad.

На рис. 6 показано задание исходных данных и начальных значений варьируемых параметров, формирование функций геометрических характеристик, вычисление расчётных усилий и параметров перемещений в среде Mathcad.

ORIGIN := 1

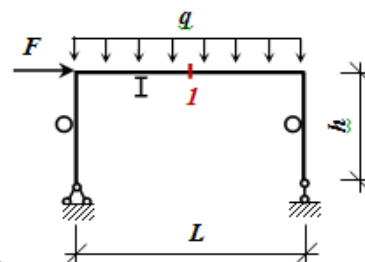
Оптимизация рамы при действии силы и распределенной нагрузки

Исходные данные

$$L := 8 \quad h := 4 \quad kt := 28$$

$$E := 2.06 \cdot 10^8 \quad R_y := 2.25 \cdot 10^5 \quad R_s := 1.25 \cdot 10^5$$

$$q := 80 \quad P := 70 \quad V_lim1 := 0.016 \quad U_lim1 := 0.04$$



Начальные значения и пределы изменения параметров (м)

$$Xmin := \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ 1 \\ 5 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2} \quad X := \begin{pmatrix} 20 \\ 10 \\ 5 \\ 20 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2} \quad Xmax := \begin{pmatrix} 120 \\ 60 \\ 8 \\ 80 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2}$$

Геометрические характеристики сечений стоек и ригеля

$$A_st(X) := \begin{cases} t \leftarrow \frac{X_4}{kt} \\ di \leftarrow X_4 - 2 \cdot t \\ A_st \leftarrow \frac{\pi \cdot [(X_4)^2 - di^2]}{4} \end{cases}$$

$$Geom_st(X) := \begin{cases} t \leftarrow \frac{X_4}{kt} \\ di \leftarrow X_4 - 2 \cdot t \\ J_st \leftarrow \frac{\pi [(X_4)^4 - di^4]}{64} \\ W_st \leftarrow \frac{2J_st}{X_4} \\ \begin{pmatrix} J_st \\ W_st \end{pmatrix} \end{cases}$$

$$A_rig(X) := [(X_1 + 2 \cdot X_2) X_3]$$

$$S_rig(X) := \frac{(X_2 - X_3) \cdot X_3}{2} \cdot \left(\frac{X_1}{2} + \frac{X_3}{2} \right)$$

$$Geom_rig(X) := \begin{cases} Jx_s \leftarrow X_3 \cdot \frac{(X_1)^3}{12} \\ A_p \leftarrow X_2 \cdot X_3 \\ Jx_p \leftarrow \left[\frac{(X_3)^3 \cdot X_2}{12} \right] \dots \\ \quad + A_p \cdot \left(\frac{X_1}{2} + \frac{X_3}{2} \right)^2 \\ J_rig \leftarrow Jx_s + 2Jx_p \\ W_rig \leftarrow \frac{2J_rig}{X_1 + 2X_3} \\ \begin{pmatrix} J_rig \\ W_rig \end{pmatrix} \end{cases}$$

Расчетные значения усилий и перемещений

$$M_rig := \left(q \cdot \frac{L^2}{8} \right) + \left(\frac{P \cdot h}{2} \right) \quad Q_rig := \left(q \cdot \frac{L}{2} \right) + \left(P \cdot \frac{h}{L} \right)$$

$$M_st := P \cdot h \quad N_st := q \cdot \frac{L}{2} + P \cdot \frac{h}{L}$$

$$V_rig := \left(5 \cdot q \cdot \frac{L^4}{384} \right) + \left(\frac{P \cdot h \cdot L^2}{16} \right) \quad U_rig1 := \left(P \cdot \frac{h^2}{3} \cdot L \right) + \left(\frac{q \cdot L^3 \cdot h}{48} \right) \quad U_rig2 := \left(P \cdot \frac{h^2}{3} \cdot h \right)$$

Рис. 6. Листинг расчётов в среде Mathcad

Геометрические характеристики сечений

$$J_{st}(X) := \text{Geom}_{st}(X)_1 \quad W_{st}(X) := \text{Geom}_{st}(X)_2$$

$$J_{rig}(X) := \text{Geom}_{rig}(X)_1 \quad W_{rig}(X) := \text{Geom}_{rig}(X)_2$$

Целевая функция $f(X) := 2A_{st}(X) \cdot h + A_{rig}(X) \cdot L$

Ограничения по прочности и жесткости

$$g(X) := kg \left(\begin{array}{l} \left(\frac{X_1}{3.5 \cdot X_3} \right) \cdot \sqrt{\frac{Ry}{E}} - 1 \\ \left(\frac{N_{st}}{A_{st}(X)} + \frac{M_{st}}{W_{st}(X)} \right) \cdot \frac{1}{Ry} - 1 \\ \left(\frac{M_{rig}}{W_{rig}(X)} \right) \cdot \frac{1}{Ry} - 1 \\ \left(\frac{Q_{rig} \cdot S_{rig}(X)}{J_{rig}(X) X_3} \right) \cdot \frac{1}{Rs} - 1 \\ \left(\frac{V_{rig}}{J_{rig}(X) \cdot E} \right) \cdot \frac{1}{V_{lim1}} - 1 \\ \left[\frac{U_{rig1}}{E J_{rig}(X)} + \frac{U_{rig2}}{(E J_{st}(X))} \right] \cdot \frac{1}{U_{lim1}} - 1 \end{array} \right)$$

$$m := 6 \quad \text{Число ограничений}$$

$$kg := 10 \quad \text{Весовой коэффициент}$$

$$g(X) = \begin{pmatrix} -9.6223 \\ 55.41058 \\ 17.13043 \\ -9.53696 \\ 75.26805 \\ 120.47219 \end{pmatrix}$$

Рис. 7. Формирование функций ограничений и целевой функции в среде Mathcad

Итерации алгоритма оптимизации

$$it := it + 1 = 2$$

$$k_{i,i} := kf \cdot \frac{y_i}{\Delta Z_{max}} + kmin \quad \Delta Z_i := \frac{kf \cdot y_i}{k_{i,i}} \quad \delta_{i,i} := \begin{cases} 1 & \text{if } g(X)_i + \Delta Z_i > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$FL(X) := f(X) + y^T \cdot \delta \cdot g(X) \quad Fp(X) := kf \cdot FL(X) + 0.5 \cdot g(X)^T \cdot \delta \cdot k \cdot g(X)$$

$$\text{Given } Xmin \leq X \leq Xmax$$

$$X := \text{Minimize}(Fp, X) = \begin{pmatrix} 0.79645 \\ 0.07 \\ 0.01 \\ 0.26868 \end{pmatrix}$$

$$g(X) = \begin{pmatrix} -2.47944 \\ 17.49515 \\ 11.81712 \\ -9.47037 \\ 15.19511 \\ 29.5899 \end{pmatrix}$$

$$Fit := f(X) \quad Git := \max(g(X))$$

$$kk_{it} := \text{match}(\max(g(X)), g(X))_{1,1}$$

Вектор y $y_i := \max\left(0, y_i + \frac{k_{i,i} \cdot g(X)_i}{kf}\right)$

Рис. 8. Последовательность операций на итерации поискового процесса оптимизации в среде Mathcad

Результаты оптимизации

Число итераций $it = 11$

Объем рамы (м куб) $f(X) = 0.24517$

Параметры
элементов (м)

$$X = \begin{pmatrix} 1.059041039 \\ 0.154132255 \\ 0.01 \\ 0.396076274 \end{pmatrix} \begin{matrix} H_{rig} \\ B_{rig} \\ t_{rig} \\ de_{st} \end{matrix}$$

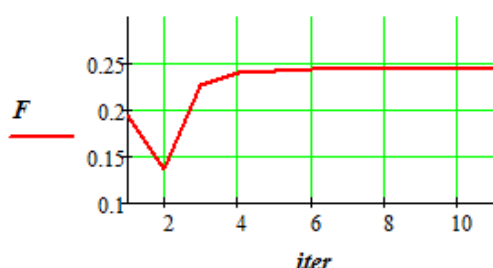
Параметры
элементов (см)

$$X \cdot 100 = \begin{pmatrix} 105.9041 \\ 15.41323 \\ 1 \\ 39.60763 \end{pmatrix}$$

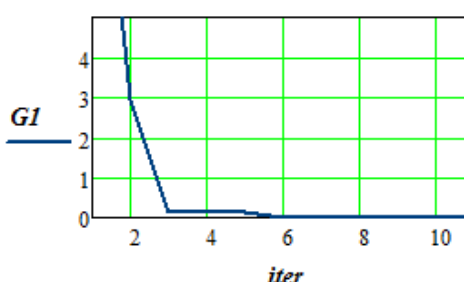
Вектор ограничений

$$g1 := \frac{g(X)}{kg} = \begin{pmatrix} 5.51324 \times 10^{-6} \\ -0.11181 \\ -1.38569 \times 10^{-4} \\ -0.94152 \\ -0.12632 \\ 4.3966 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

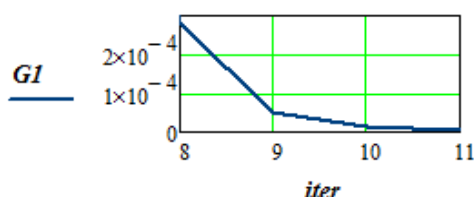
Изменения целевой функции
на итерациях



Изменения максимальных значений
ограничений на итерациях



Изменения максимальных значений
ограничений на последних итерациях



Конструктивное ограничение

$$g1_1 = 5.51324 \times 10^{-6}$$

Ограничения по нормальным
напряжениям в ригеле

$$g1_6 = 4.3966 \times 10^{-6}$$

Ограничения на горизонтальное
перемещение узла 1

$$g1_3 = -1.38569 \times 10^{-4}$$

Оптимальные значения параметров сечений с учетом округлений в см

Решение 1. Округление до целого числа в см

$$Xopt1 := \text{ceil}(X \cdot 100) = \begin{pmatrix} 106 \\ 16 \\ 1 \\ 40 \end{pmatrix}$$

$$f(Xopt1) = 2.488865 \times 10^3$$

$$gopt1 := \frac{g\left(\frac{Xopt1}{100}\right)}{kg} = \begin{pmatrix} 9.11018 \times 10^{-4} \\ -0.1368 \\ -0.0191 \\ -0.94029 \\ -0.14365 \\ -0.03084 \end{pmatrix}$$

Решение 2. Округление до первого знака в см

$$Xopt2 := \text{round}(X \cdot 100, 1) = \begin{pmatrix} 105.9 \\ 15.4 \\ 1 \\ 39.6 \end{pmatrix}$$

$$f(Xopt2) = 2.450907 \times 10^3$$

$$gopt2 := \frac{g\left(\frac{Xopt2}{100}\right)}{kg} = \begin{pmatrix} -3.32381 \times 10^{-5} \\ -0.11131 \\ 3.25218 \times 10^{-4} \\ -0.94154 \\ -0.12588 \\ 6.63475 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Рис. 9. Результаты расчёта с использованием алгоритма оптимизации в среде Mathcad

Результаты исследования. Полученные результаты могут быть верифицированы прямым расчётом с использованием любого программного комплекса [9]. Помимо этого, необходимо выполнить проверку на достижение глобального оптимума. Эту проверку обычно производят заданием нескольких начальных проектов, что и было выполнено в данном исследовании. Отметим, что не при всех начальных параметрах в рассмотренной задаче была достигнута сходимость. Так, при задании значений, близких к верхнему пределу изменения этих параметров, алгоритм расходился и решение не было получено.

Приведём результаты решений при задании 4 начальных значений варьируемых параметров и покажем сходимость в изменении целевой функции на итерациях (см. рис. 10). Как видно из графиков, результаты всех четырёх расчётов практически совпадают уже на 4-й итерации. Далее наблюдаются небольшие колебания значений функции цели, повышающие точность в невязках ограничений.

Подобным же образом с использованием инструментов программы Mathcad могут быть формализованы и решены задачи, где реализованы алгоритмы оптимизации конструкций различного вида [10; 11].

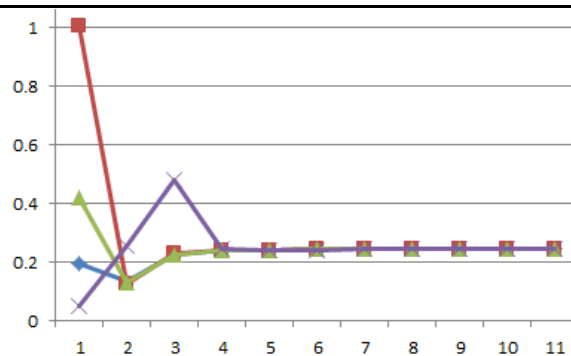


Рис. 10. Изменения целевой функции на итерациях при различных начальных проектах

ЛИТЕРАТУРА

1. Akimov, P. A. About The national software system for structural analysis / P. A. Akimov, A. M. Belostotsky, O. V. Kabantsev, V. N. Sidorov, A. R. Tusnin // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Vol. 18, № 1. – P. 151-155.
2. Методы топологической оптимизации в программном комплексе 3D PRINTER / Д. Ю. Дьянов, А. Н. Медведкина, А. Н. Быков, В. В. Попов // Математическое моделирование. – 2019. – Т. 31. – № 7. – С. 75-90.
3. Hill, C. Optimization with scipy.optimize. In: Python for Chemists. Cambridge: Cambridge University Press. 2023. – P. 247-259.
4. Alekseytsev, A. V. Optimization of bearing structures subject to mechanical safety: an evolutionary approach and software // A. V. Alekseytsev, Al Ali Mohamad // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – 18 (2). – P. 131-142.
5. Lalwani, S. A Survey on Parallel Particle Swarm Optimization Algorithms / S. Lalwani, H. Sharma, S. C. Satapathy, K. Deep, J. C. Bansal // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. Vol. 44. – P. 1899-1923.
6. Alekseytsev, A. V. Optimization of hybrid I-beams using modified particleswarm method / A. V. Alekseytsev, Al Ali Mohamad // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – 83 (7). – P. 175-185.
7. Abdi, M. Topology optimization of geometrically nonlinear structures using an evolutionary optimization method / M. Abdi, I. Ashcroft, R. Wildman // Engineering Optimization. – 2018. – Vol. 50, № 11. – P. 1850-1870.
8. Дмитриева, Т. Л. Сравнительная оценка результатов оптимального проектирования ферм с использованием программных средств / Т. Л. Дмитриева, Ле Чан Минь Дат // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2014. – Vol. 12. – № 3. – С. 110-117.
9. Дмитриева, Т. Л. Верификация программных комплексов расчёта и оптимизации конструкций / Т. Л. Дмитриева // International Journal for Computation Civil and Structural Engineering. – 2011. – Vol. 7. – № 3. – P. 95-102.
10. Петров, М. Р. Исследование характеристик гиперэластичного материала в случае расчёта конструкций, состоящих из тонких стержней / М. Р. Петров, А. Н. Петрова, В. М. Петров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № IV (28). – С. 12-15.
11. Петров, М. Р. Определение диаграммы растяжения трубчатого стержня из гиперэластичного материала / М. Р. Петров, А. Н. Петрова, С. Ф. Хакимов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № II-1 (34). – С. 29-34.



Иванкова Е. П., Колесник М. Б.

E. P. Ivankova, M. B. Kolesnik

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В ПАКЕТЕ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**INVESTIGATION OF AN ELECTROMECHANICAL RECIPROCATING MOTION DRIVE
IN A SIMULATION PACKAGE**

Евгения Павловна Иванкова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: jenyvany@mail.ru.

Evgeniya P. Ivankova – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: jenyvany@mail.ru.

Колесник Максим Борисович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Maksim B. Kolesnik – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Аннотация. В работе проведён анализ экономических и экологических последствий от порывов магистральных трубопроводов из-за увеличения мощностей трубопроводного транспорта в рамках реализации крупных нефтегазовых проектов. Показано, что снижение ущерба может быть обеспечено за счёт использования электромеханического привода задвижки. Методом математического моделирования установлена зависимость нагрузки со стороны рабочей жидкости (воды), действующей на заслонку задвижки, при её перемещении с учётом изменяющихся параметров гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции. Предложен алгоритм выполнения расчёта, включающий определение характера изменения рабочего расхода и напора в гидравлическом тракте от степени закрытия задвижки. Приведены результаты расчётов усилий, действующих на заслонку в каждом её положении, с помощью встроенной в пакет Ansys CFX функции. Получены графики зависимостей нагрузок, действующих на заслонку задвижки, учитывающих изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции. Установлено, что зависимости нагрузок, учитывающие изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции, наиболее близки к реальным условиям работы магистральных трубопроводов.

Summary. The paper analyzes the economic and environmental consequences of main pipeline gusts due to increased pipeline transport capacity as part of the implementation of large oil and gas projects. It is shown that damage reduction can be achieved by using an electromechanical valve actuator. The mathematical modeling method has established the dependence of the load from the working fluid (water) acting on the valve flap during its movement, taking into account the changing parameters of the hydraulic tract and the external hydraulic characteristics of the pumping station. An algorithm for performing the calculation is proposed, including determining the nature of changes in the operating flow rate and pressure in the hydraulic tract from the degree of closure of the valve. The results of calculations of the forces acting on the flap in each of its positions using the built-in Ansys CFX function are presented. Graphs of the dependences of the loads acting on the gate valve are obtained, taking into account the changing parameters of the hydraulic tract and the external hydraulic characteristics of the pumping station. It is established that the load dependences, taking into account the changing parameters of the hydraulic tract and the external hydraulic characteristics of the pumping station, are closest to the actual operating conditions of the main pipelines.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, электропривод запорной арматуры, гидравлический расчёт, осевые нагрузки.

Key words: main pipeline, electric shut-off valve drive, hydraulic calculation, axial loads.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00089).

УДК 621.313:681.5:004.94

Введение. Экономические и экологические последствия повреждений магистральных трубопроводов связаны не только со стоимостью утраченного транспортируемого продукта (природный газ, нефть, их производные) и простым трубопровода до завершения ремонтно-восстановительных работ, но и комплексом мероприятий по рекультивации загрязнённых территорий. Расходы на устранение последствий разлива нефти и их производных могут достигать десятков и сотен миллиардов рублей.

Согласно данным, предоставленным Министерством энергетики Российской Федерации, за 2023 г. на магистральных нефтепроводах зарегистрировано 5873 случая нарушения их целостности (порыва), что привело к утечке 730 тыс. баррелей нефти общей стоимостью порядка 5,5 млрд р.

Причинами возникновения порывов в большей степени являются коррозионные воздействия, в меньшей – несанкционированные противоправные действия, дефекты строительно-монтажных работ и изделий, стихийные бедствия [1–4].

По данным на 2024 г., приоритетными направлениями развития нефтегазовой отрасли России являются проекты «Восток Ойл», «Сила Сибири – 2» и «Арктик СПГ 2», что свидетельствует об увеличении мощностей трубопроводного транспорта и количества эксплуатируемых запорных арматур.

Снижение ущерба от порывов трубопроводов возможно за счёт увеличения количества запорной арматуры с электроприводом. Однако использование большого числа последовательно встроенных в трубопровод задвижек, во-первых, повышает стоимость, а во-вторых, снижает надёжность трубопроводной системы вследствие конструкционной сложности промышленно выпускаемой запорной арматуры.

Анализ опубликованных работ по данной проблеме [5–12] подтверждает актуальность исследования, но при этом комплексный научно обоснованный подход, обеспечивающий создание непосредственных электроприводов с учётом особенностей энергетически связанных сложных технологических процессов, отсутствует.

Согласно ГОСТ Р 50369-92, ГОСТ Р 59063-2020, ГОСТ 33852-2016, задвижки для магистральных трубопроводов должны соответствовать показателям надёжности и безопасности.

Анализ применяемых задвижек показывает, что наиболее дорогостоящим и ответственным элементом конструкции задвижки является электропривод.

Снижение стоимости и упрощение конструкции электроприводов, адаптированных к запорной арматуре, обеспечивает электромеханический привод, описанный в [13; 14].

Для осуществления частотного регулирования: изменения механического момента на валу электродвигателя, мощности, частоты вращения вала ротора, обеспечивающих соответствие механической характеристики привода изменяющемуся усилию, приложенному со стороны рабочей жидкости к заслонке задвижки при её перемещении – необходимо проведение инженерного анализа в среде имитационного моделирования.

Объект и методика исследования. Для определения характера изменения усилий, действующих на исполнительный механизм, электродвигатель и другие элементы конструкции задвижки с учётом изменяющихся рабочих параметров (напор, расход) течения жидкости на входе в область гидравлического тракта задвижки в зависимости от степени закрытия необходимо последовательно решить ряд задач:

1. определить зависимость рабочего расхода $Q_p = f(\gamma)$ и напора $p_p = f(\gamma)$ в гидравлическом тракте от степени закрытия задвижки γ , %;

2. спроектировать 3D-модель электромеханического привода задвижки;
3. преобразовать 3D-модель электромеханического привода задвижки для моделирования в пакете Ansys CFX;
4. построить сетку 3D-модели в пакете Ansys CFX;
5. выполнить гидравлический расчёт в пакете Ansys CFX в автоматическом режиме и провести обработку результатов моделирования.

Определение характера изменения рабочего расхода $Q_p = f(\gamma)$ и напора $p_p = f(\gamma)$ в гидравлическом тракте от степени закрытия задвижки γ . В процессе закрытия задвижки сечение канала в области заслонки уменьшается, вследствие этого увеличивается суммарное гидравлическое сопротивление трубопровода на участке от перекачивающей станции до задвижки. Характеристика давления гидравлического тракта смещается, и рабочий напор и расход изменяются. Для получения результатов, наиболее близких к реальным, необходимо учитывать изменяющиеся параметры перекачивающей станции для выбранных расчётных положений заслонки (степени закрытия γ), где рабочими параметрами являются рабочий напор жидкости (воды) p_p , рабочий расход жидкости (воды) Q_p .

Определение суммарного гидравлического сопротивления выполняется в соответствии с эквивалентной схемой гидравлического тракта задвижки, показанной на рис. 1.

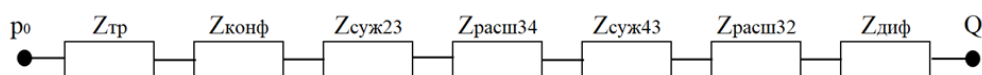


Рис. 1. Эквивалентная гидравлическая схема

На рис. 1 приведены местные гидравлические сопротивления: $Z_{тр}$ – сопротивление трения для участка трубопровода; $Z_{конф}$ – сопротивление при постепенном сужении с S_1 до S_2 ; $Z_{суж23}$ – сопротивление при внезапном сужении канала с сечения S_2 до S_3 ; $Z_{расш34}$ – сопротивление при внезапном расширении канала с сечения S_3 до S_4 ; $Z_{суж43}$ – сопротивление при внезапном сужении канала с сечения S_4 до S_3 ; $Z_{расш32}$ – сопротивление при внезапном расширении канала с сечения S_3 до S_2 ; $Z_{диф}$ – сопротивление при постепенном расширении с S_2 до S_1 .

Порядок определения расчётных величин, необходимых для построения характеристики изменения рабочего расхода $Q_p = f(\gamma)$ и напора $p_p = f(\gamma)$ в гидравлическом тракте от степени закрытия задвижки γ , приведён в табл. 1.

Таблица 1

Порядок определения расчётных величин

Обозначение	Описание	Размерность	Расчётное выражение
1	2	3	4
S_1	Сечение трубопровода на входе в задвижку – выходе из задвижки	m^2	$S_1 = \pi \cdot \frac{D_1^2}{4}$
S_2	Сечение контура трубопровода, прилегающего к заслонке	m^2	$S_2 = \pi \cdot \frac{D_2^2}{4}$
S_3	Сечение канала, полученное наложением контура заслонки на контур трубопровода, прилегающего к заслонке в плоскости YOZ, для соответствующей степени закрытия задвижки	m^2	Определяется путём геометрического построения элементов трубопровода в программном комплексе T-FLEXCAD
S_4	Сечение канала трубопровода в области под заслонкой в плоскости YOZ для соответствующей степени закрытия задвижки	m^2	Определяется путём геометрического построения элементов трубопровода в программном комплексе T-FLEXCAD

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
δ	Относительная шероховатость канала трубы	–	$\delta = \frac{\Delta}{D_1}$
w_1	Средняя скорость течения воды на участке трубопровода между перекачивающей станцией и задвижкой	м/с	$w_1 = \frac{Q_p}{S_1}$
Re	Критерий Рейнольдса/The Reynolds Criterion	–	$Re = \frac{w_1 \cdot D_1}{\nu}$
$\lambda_{тр}$	Коэффициент гидравлического трения для канала из стальной трубы	–	$\lambda_{тр} = 0,11 \cdot \left(\delta + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$
$Z_{тр}$	Гидравлическое сопротивление трения для участка трубопровода	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_{тр} = \lambda_{тр} \cdot \frac{L_{тр}}{D_1} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot S_1^2}$
p_p	Рабочий напор жидкости через полностью открытую задвижку	МПа	$p_p = Q_p^2 \cdot Z_{тр} \cdot 10^{-6}$
$\xi_{конф}$	Коэффициент местного гидравлического сопротивления при постепенном сужении с S_1 до S_2	–	$\xi_{конф} = k_k \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right)$
$Z_{конф}$	Гидравлическое сопротивление при постепенном сужении с S_1 до S_2	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_{конф} = \xi_{конф} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot S_2^2}$
$\xi_{суж23}$	Коэффициент местного гидравлического сопротивления при внезапном сужении канала с сечения S_2 до S_3	–	$\xi_{суж23} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_3}{S_2} \right)$
$Z_{суж23}$	Гидравлическое сопротивление при внезапном сужении канала с сечения S_2 до S_3	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_{суж23} = \xi_{суж23} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot S_3^2}$
$\xi_{расш34}$	Коэффициент гидравлического сопротивления при внезапном расширении канала с сечения S_3 до S_4	–	$\xi_{расш34} = \left(1 - \frac{S_3}{S_4} \right)^2$
$Z_{расш34}$	Гидравлическое сопротивление при внезапном расширении канала с сечения S_3 до S_4	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_{расш34} = \xi_{расш34} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot S_3^2}$
$\xi_{суж43}$	Коэффициент местного гидравлического сопротивления при внезапном сужении канала с сечения S_4 до S_3	–	$\xi_{суж43} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_3}{S_4} \right)$
$Z_{суж43}$	Гидравлическое сопротивление при внезапном сужении канала с сечения S_4 до S_3	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_{суж43} = \xi_{суж43} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot S_3^2}$
$\xi_{расш32}$	Коэффициент гидравлического сопротивления при внезапном расширении канала с сечения S_3 до S_2	–	$\xi_{расш32} = \left(1 - \frac{S_3}{S_2} \right)^2$
$Z_{расш32}$	Гидравлическое сопротивление при внезапном расширении канала с сечения S_3 до S_2	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_{расш32} = \xi_{расш32} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot S_3^2}$
$\xi_{диф}$	Коэффициент местного гидравлического сопротивления при постепенном расширении канала с сечения S_2 до S_1	–	$\xi_{диф} = k_d \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right)^2$
$Z_{диф}$	Гидравлическое сопротивление при постепенном расширении канала с сечения S_2 до S_1	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_{диф} = \xi_{диф} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot S_2^2}$
Z_3	Суммарное гидравлическое сопротивление задвижки	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_3 = Z_{конф} + Z_{суж23} + Z_{расш34} + Z_{суж43} + Z_{расш32} + Z_{диф}$
Z_Σ	Суммарное гидравлическое сопротивление трубопровода и задвижки	$H \cdot \frac{c^2}{м^8}$	$Z_\Sigma = Z_3 + Z_{тр}$
p_p, Q_p	Давление, производительность	МПа, м ³ /с	$\begin{cases} p_p = Z_\Sigma \cdot Q_p^2 \\ p_p = p_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{Q_p}{Q_m} \right)^2 \right] \end{cases}$

Для определения местных гидравлических сопротивлений должны быть заданы:

1. параметры перекачивающей станции (Q_m – максимальный расход воды; p_0 – напор холостого хода; Q_p – рабочий расход воды через полностью открытую задвижку);
2. параметры трубопровода ($L_{тр}$ – длина участка трубопровода между перекачивающей станцией и задвижкой; D_1 – диаметр трубопровода на входе в задвижку/выходе из задвижки; Δ – абсолютная шероховатость канала из стальной трубы);
3. параметры задвижки (D_2 – диаметр канала в сечении трубопровода YOZ, прилегающего к заслонке; α – угол сходимости конфузора; k_k – коэффициент, учитывающий уменьшение потерь напора в конфузоре по сравнению с потерями напора при внезапном сужении для соответствующего α ; β – угол конусности диффузора; k_d – коэффициент, учитывающий уменьшение потерь давления в диффузоре по сравнению с потерями напора при внезапном расширении для соответствующего β);
4. физические свойства перекачиваемой жидкости (ρ – плотность жидкости; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости).

Характерные расчётные сечения показаны на рис. 2.

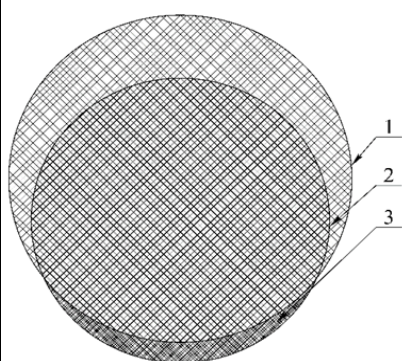


Рис. 2. Определение сечения канала S_3 :

- 1 – контур заслонки;
- 2 – контур трубопровода, прилегающего к заслонке;
- 3 – сечение S_3

Методика создания параметризуемой 3D-модели электромеханического привода задвижки для моделирования в пакете Ansys CFX. После выполнения построения характеристики изменения рабочего расхода $Q_p = f(\gamma)$ и напора $p_p = f(\gamma)$ в гидравлическом тракте от степени закрытия задвижки γ для определения усилий, действующих на заслонку, необходимо создание 3D-модели электромеханического привода задвижки.

Модель позволяет решить следующие основные задачи:

- установить количественные связи параметров привода с параметрами реализуемого с его использованием технологического процесса на этапе проектирования;
- обеспечить возможность оптимизации размерных соотношений и технико-экономических показателей как устройства в целом, так и отдельных его элементов при помощи учёта при проектировании действующих нагрузок;
- определить места концентрации напряжений и на этой основе повысить надёжность моделируемой технической системы

исходя из принципа равнопрочности;

- решать задачи обеспечения вариативного проектирования, проработки компоновки, проверки соответствия сопрягаемых элементов, создания расчётных моделей;
- произвести расчёт динамических характеристик;
- создать анимацию физических процессов при варьировании проектных параметров;
- визуализировать конструкторско-технологические процессы, подготовить полный комплект конструкторской документации: сборочные чертежи, спецификации, чертежи деталей.

Ввиду особенностей работы программы Ansys CFX для выполнения гидравлического расчёта необходима 3D-модель не самого трубопровода с задвижкой, а внутренней полости, по которой протекает жидкость.

Создание сетки 3D-модели имеет ряд особенностей:

- при $\gamma < 60\%$, когда сечения S_3 , S_4 достаточно велики, создание сетки выполняется без дополнительных геометрических преобразований;
- при $\gamma = 86\%$, когда сечения S_3 , S_4 становятся малыми настолько, что при предыдущем способе создания сетки точность результатов расчёта снижается, в область 3D-модели, где необходимо создать сетку более высокого класса точности, добавляется стороннее тело. С помощью функции «Body Sizing» в областях пересечения 3D-модели и стороннего тела осуществляется уменьшение размера сетки до величины, необходимой для получения требуемой точности результатов.

– при $\gamma = 88\%$, когда сечения S_3, S_4 становятся ещё меньше, для сохранения точности результатов и минимизации повышения требований к ресурсам персонального компьютера применяется создание дополнительных тел с заданными параметрами геометрии и сетки в области заслонки с последующим использованием функции «Body Sizing». Каждое тело, находящееся внутри другого, имеет сетку более высокого класса точности относительно предыдущего.

Следующим этапом выполняется задание входных параметров p_p, Q_p для каждого положения заслонки и производится выполнение гидравлического расчёта в пакете Ansys CFX.

Выполнение расчёта в пакете Ansys CFX и обработка результатов моделирования. Расчёт выполняется в автоматическом режиме. Критериями успешного выполнения задачи является достижение уровня невязок ниже заданного значения и установившихся значений действующих усилий на заслонку в проекциях на оси OX, OY, OZ .

Обработка результатов включает извлечение значений действующих усилий на заслонку в проекциях на оси OX, OY, OZ . Для этого на этапе создания сетки элементы конструкции, выполняющие функцию параметра «Wall» (стенка), необходимо разделить на отдельные узлы, подходящие для дальнейшей работы с ними после завершения расчёта. Так, все элементы поверхности заслонки необходимо определить как отдельный узел «Zaslonka», выполняющий функцию параметра «Wall» (стенка). Таким образом, после завершения гидравлического расчёта с помощью операции «Function Calculator» определяются значения действующих усилий на заслонку в проекциях на оси OX, OY, OZ для узла «Zaslonka».

Для нахождения осевых усилий, действующих на заслонку, необходимо выполнить расчёт для каждой выбранной степени закрытия задвижки.

Результирующее значение осевого усилия F_1 в заданном положении заслонки при закрытии задвижки определяется по следующему выражению:

$$F_1 = F_y + \mu_c \cdot (F_x + F_z) - m \cdot g, \quad (1)$$

где $\mu_c = 0,15$ – коэффициент трения сухих поверхностей при покое/скольжении; m – масса клина со шпинделем, кг; $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения.

Результирующее значение осевого усилия F_2 в заданном положении заслонки при открытии задвижки определяется по следующему выражению:

$$F_2 = -F_y + \mu_c \cdot (F_x + F_z) + m \cdot g. \quad (2)$$

Исходные данные, необходимые для определения характера изменения рабочего расхода и напора в гидравлическом тракте от степени закрытия задвижки для конкретно выбранного типа перекачивающей станции, трубопровода, задвижки и перекачиваемой жидкости, приведены ниже.

Параметры перекачивающей станции: максимальный расход воды $Q_m = 0,424$ м³/с, напор холостого хода $p_0 = 13,33$ МПа, рабочий расход воды через полностью открытую задвижку $Q_p = 0,212$ м³/с.

Параметры трубопровода между перекачивающей станцией и задвижкой: длина участка трубопровода между перекачивающей станцией и задвижкой $L_{тр} = 45\,400$ м, диаметр трубопровода (диаметр канала на входе/выходе задвижки) $D_1 = 0,3$ м, абсолютная шероховатость канала из стальной трубы $\Delta = 0,075 \cdot 10^{-3}$ м.

Параметры задвижки: диаметр канала в сечении трубопровода YOZ , прилегающего к заслонке, $D_2 = 0,2$ м, угол сходимости конфузора $\alpha = 40$ град., угол конусности диффузора $\beta = 9,2$ град.

Физические свойства перекачиваемой жидкости (воды): плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³, кинематический коэффициент вязкости воды при 25 °C $\nu = 0,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

В результате определения местных гидравлических сопротивлений для каждого выбранного положения заслонки получены значения рабочих параметров (рабочий расход и напор) жидкости (воды). Для каждого выбранного положения заслонки выполнен гидравлический расчёт в пакете Ansys CFX в автоматическом режиме. В результате на плоскости сечения задвижки XOY по-

лучены области распределения скорости течения потока воды, которые приведены на рис. 3 для $\gamma = 72\%$ и $\gamma = 88\%$.

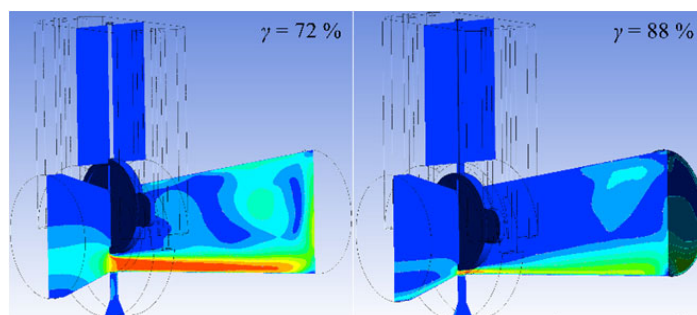


Рис. 3. Области распределения скорости течения жидкости в плоскости сечения задвижки для $\gamma = 72\%$ и $\gamma = 88\%$

Графики зависимостей усилий $F_x = f(\gamma)$, $F_y = f(\gamma)$, рассчитанные с помощью встроенной функции «Function Calculator» в пакете Ansys CFX, приведены на рис. 4.

Полученные с помощью выражений (1) и (2) значения результирующих осевых усилий, действующих на заслонку при закрытии и открытии задвижки, для дискретных положений заслонки приведены на рис. 5.

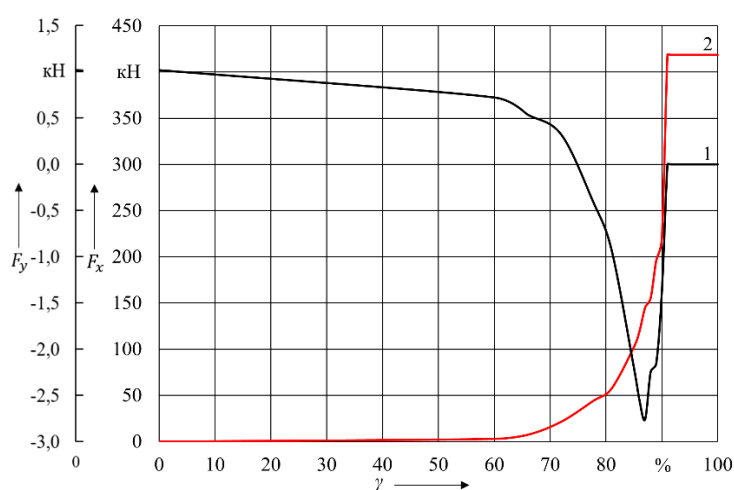


Рис. 4. График зависимостей усилий в проекциях на ось OX и OY :
1 – $F_y = f(\gamma)$; 2 – $F_x = f(\gamma)$

Сравнение полученных значений с расчётами, выполненными ранее в пакете SolidWorks Flow Simulation без учёта изменяющихся параметров гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции и аналитических результатов [15], показано на рис. 6 (1 – зависимость $F_1 = f(\gamma)$, полученная в пакете Ansys CFX и учитывающая изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции; 2 – зависимость $F_2 = f(\gamma)$, полученная в пакете Ansys CFX, учитывающая изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции; 3 – зависимость $F_1 = f(\gamma)$, полученная в пакете SolidWorks Flow Simulation, не учитывающая изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции; 4 – зависимость $F_2 = f(\gamma)$, полученная в пакете SolidWorks Flow Simulation, учитывающая изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции).

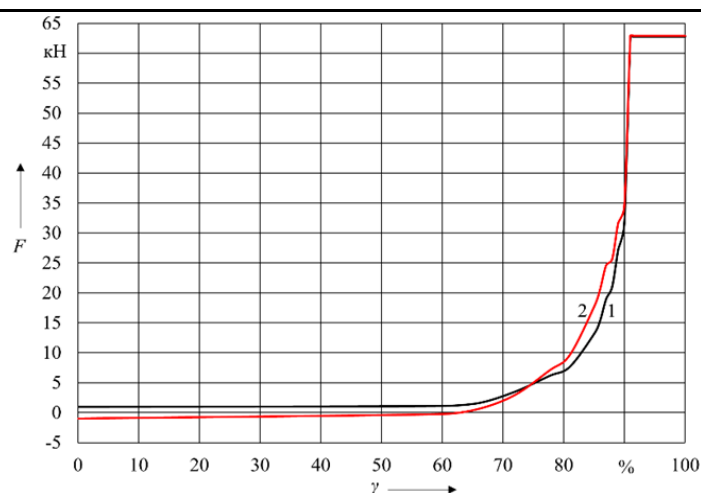


Рис. 5. Графики зависимостей результирующих осевых усилий при закрытии и открытии задвижки: 1 – при закрытии $F_1 = f(\gamma)$; 2 – при открытии $F_2 = f(\gamma)$

Из рис. 6 видно, что при значениях $0 < \gamma < 80\%$ осевые усилия изменяются незначительно и кривые 1, 2, учитывающие, и кривые 3, 4, не учитывающие изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции, отличаются не более чем на 5 %. При значениях $80 < \gamma < 87\%$ осевые усилия резко увеличиваются при малом увеличении γ и кривые 1, 2, учитывающие, и кривые 3, 4, не учитывающие изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции, имеют более значительные отклонения. При значении $\gamma = 87\%$ кривые 3, 4, не учитывающие изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции, достигают своих максимальных значений и рост осевых усилий прекращается до значения $\gamma = 100\%$, напротив, кривые 1, 2, учитывающие изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции, достигают своих максимальных значений при $\gamma > 90\%$. Максимальные значения, которые принимают кривые 1, 2, больше на 33 % в сравнении с кривыми 3, 4. Таким образом, при нахождении зависимости характера изменения нагрузки со стороны рабочей жидкости (воды), действующей на заслонку при её перемещении в плоскости задвижки, необходимо учитывать изменяющиеся параметры гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции. Результаты, полученные в пакете Ansys CFX, учитывающие указанные критерии, являются наиболее близкими к реальным условиям работы магистральных трубопроводов.

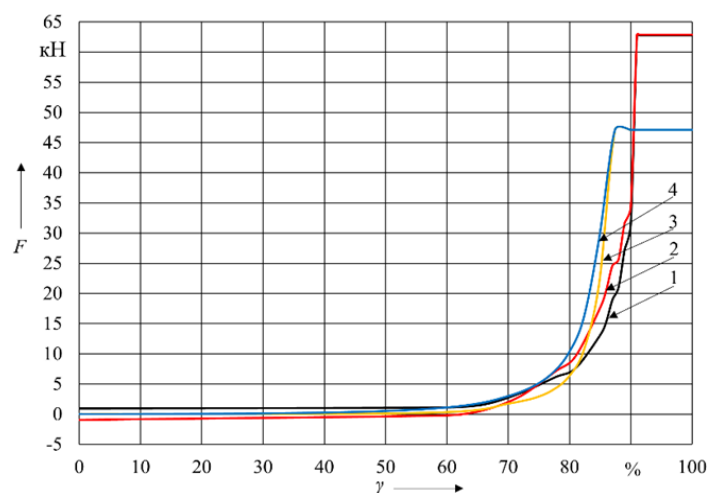


Рис. 6. Графики зависимостей результирующих осевых усилий

Выводы. Рассмотренная методика расчёта осевых усилий, действующих на заслонку задвижки в зависимости от степени её закрытия с учётом изменяющихся параметров гидравлического тракта и внешней гидравлической характеристики перекачивающей станции, является основой для синтеза системы управления моментом электропривода задвижки. Её использование позволяет проектировать экономически и энергетически эффективную электромеханическую систему привода задвижки.

В случае использования задвижки как средства аварийной локализации повреждённого участка трубопровода определяющей нагрузочной характеристикой при работе механизма является зависимость результирующего осевого усилия при закрытии задвижки от степени закрытия γ , а ограничивающим фактором для выбора электродвигателя является максимальное значение вращающего момента, определяемое максимальным значением результирующего осевого усилия при закрытии задвижки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Study of the pipeline in emergency operation and assessing the magnitude of the gas leak / A. M. Schipachev, A. D. Nazyrov // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 1-15. DOI: 10.3390/en15145294.
2. Шестаков, Р. А. Алгоритм обнаружения утечек нефтепродуктов при трубопроводном транспорте с промежуточным отбором / Р. А. Шестаков, Д. Р. Макулов, Ю. С. Матвеева // *Нефтегазовое дело*. – 2024. – Т. 22. – № 1. – С. 150-159.
3. Дульченко, А. А. Методика определения местоположения утечек и несанкционированных врезок на нефтепроводах / А. А. Дульченко, Р. А. Шестаков, Ю. С. Матвеева // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 26-36.
4. Чионов, А. М. Зависимость погрешности определения координаты утечки от параметров оснащённости трубопровода средствами измерения давления / А. М. Чионов, С. А. Коршунов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 104-108.
5. Акименко, А. В. Методика и алгоритм расчёта местных потерь напора в трубопроводах / А. В. Акименко, Е. А. Аникеев, Р. Ю. Медведев // *Моделирование систем и процессов*. Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. – 2024. – Т. 16. – № 4. – С. 7-15.
6. Electric Motors for Variable-Speed Drive of Lock Valves / A. Udovichenko, D. Kaluzhskij, N. Uvarov // *Electronics*. – 2021. – P. 1-14. DOI:10.3390/electronics10212727.
7. Ахrameева, Е. В. Модель преобразователя углового перемещения в линейное на базе передачи «винт-гайка» / Е. В. Ахrameева, Т. Р. Кузнецова // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2022. – № 9. – С. 24-28.
8. Мартиросян, А. Г. Электромагнитные приводы клапанов осевого потока. Обзор и анализ технических решений / А. Г. Мартиросян, И. А. Большенко, А. С. Косарев // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2023. – Т. 66. – № 2. – С. 14-24.
9. Analysis of magnetic force of electromagnet ball valve during pipeline hydraulic transients / C. Wen-zhi, Z. Tian-yang // *2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*. – 2015. – P. 1113-1117, DOI: 10.1109/FPM.2015.7337285.
10. On Efficiency Measurement of Motor-Drive Systems / E. Agamloh // *Proceedings of the 10th international conference on energy efficiency in motor driven system (EEMODS' 2017)*. Publications Office of the European Union. – 2018. – P. 652-667.
11. Calculating energy consumption of motor systems with varying load using iso efficiency contours / D. Vanhooydonck, W. Symens, W. Deprez // *The XIX International Conference on Electrical Machines*. – 2010. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607992.
12. Control Strategy of Switched Reluctance Motor Based on Embedded System / M. Yaich, M. Charaiani // *Journal of Electrical Systems*. – 2018. – P. 156-173.
13. Ким, К. К. Определение мощности электропривода герметичной задвижки с учётом действующих нагрузок / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. Б. Колесник // *Энергобезопасность и энергосбережение*. – 2023. – № 1. – С. 68-77.
14. The Determination of Output Parameters of the Electric Drive of the Sealed Valve of the Main Pipeline / S. N. Ivanov, M. B. Kolesnik, K. K. Kim // *Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME)*. ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Springer, Cham. International Publishing AG. – 2023. – P. 158-167. DOI: 10.1007/978-3-031-38126-3_17.
15. Андрианов, И. К. Математическая модель нагружения шибера в процессе открытия-закрытия задвижки трубопровода / И. К. Андрианов, С. Н. Иванов, М. Б. Колесник // *Нефтегазовое дело*. – 2025. – Т. 23. – № 1. – С. 121-130.

Фролов А. В., Швец А. Н., Мусихин Ю. Ф.

A. V. Frolov, A. N. Shvets, Y. F. Musihin

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯТОРА ДЛЯ ДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

APPLICATION OF MODIFIED SIGMA-DELTA MODULATOR FOR DIGITAL SIGNALS FREQUENCY DIVISION

Фролов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Aleksei V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Швец Александр Николаевич – студент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: peit@knastu.ru.

Alexander N. Shvets – Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: peit@knastu.ru.

Мусихин Юрий Федорович – студент кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: pm@knastu.ru.

Yuri F. Musihin – Student, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: pm@knastu.ru.

Аннотация. Представлены результаты проектирования устройства деления частоты цифровых сигналов с дробным переменным коэффициентом деления с применением сигма-дельта модулятора. Представлены результаты моделирования работы разработанного алгоритма и устройства в симуляторе SimInTech. Проведён сравнительный анализ параметров предложенного алгоритма и существующих аналогов. Показано, что модификация схемы сигма-дельта модулятора позволяет повысить равномерность распределения выходных сигналов в пределах периода, в некоторых случаях уменьшить период выходного сигнала при незначительном повышении ресурсоёмкости алгоритма.

Summary. There are presented the results of a device and an algorithm designing for dividing the digital signals frequency with a fractional variable division coefficient by a sigma-delta modulator. This solution provides a more uniform pulse distribution by generating output signals from the rising and falling edges of the input signals. The article presents the results of modeling the operation of the developed algorithm and device in the SimInTech simulator. A comparative parameters analysis of the proposed algorithm and existing analogues was carried out. It is shown that modification of the sigma-delta modulator circuit, which ensures a shift of the output signal by half the period of the input signal, makes it possible to increase the output signals distribution uniformity within the period, and in some cases to reduce the output signal period with a slight increase in the algorithm resource intensity.

Ключевые слова: делитель частоты, цифровой сигнал, дробный коэффициент деления, переменный коэффициент деления, сигма-дельта модулятор, SimInTech, алгоритм, схема.

Key words: frequency divider, digital signal, fractional division coefficient, variable division coefficient, sigma-delta modulator, SimInTech, algorithm, circuit.

Исследования, изложенные в материале статьи, проводились в рамках гранта № ВН001/2023.



УДК 621.3.076.7

Введение. Для работы современных цифровых устройств, входящих в одну систему, нередко требуются сигналы синхронизации с разными частотами, что обеспечивается применением синхронизированных между собой тактовых сигналов. Для этого технически и экономически целесообразно использовать один тактовый генератор, а остальные частоты получать путём деления указанной частоты. Эту задачу решает делитель частоты с постоянным коэффициентом деления. В системах автоматики существует другая актуальная задача получения синхронизированных сигналов с изменяемой частотой, например для управления скоростью вращения шаговых электродвигателей или другими исполнительными устройствами. Эта задача решается с помощью делителя частоты с переменным коэффициентом деления [4]. Так как большинство современных цифровых решений реализуется на универсальных программируемых устройствах [10], то разрабатываемый делитель частоты должен быть оптимизирован с позиции ресурсоёмкости и скорости работы.

В литературе [1; 7] встречаются предложения применения счётчиков для получения делителей с дробным коэффициентом деления. Предполагается, что эти схемы содержат два делителя с целочисленными коэффициентами деления и коммутатор, который часть периода пропускает на выход схемы сигналы от одного делителя, а часть периода – от другого делителя. Но алгоритм работы коммутатора в этих источниках не раскрывается. В [9] предложен возможный алгоритм управления коммутатором и коэффициентами деления счётчиков. Но этот алгоритм отличается сложностью расчётов коэффициентов делителя под заданный коэффициент деления. Кроме того, неоптимальный выбор коэффициентов делителя приводит к увеличению периода выходных сигналов, т. е. к большой продолжительности генерирования сигналов с разными частотами, что будет проявляться в заметном колебании скорости работы исполнительного устройства.

В [9] предложена схема делителя частоты, которая в реальном времени сравнивает количество прошедших на вход входных сигналов с требуемым количеством выходных сигналов на данный момент времени и принимает решение о пропуске очередного входного сигнала на выход или его задерживании. Этот алгоритм обеспечивает минимальный период выходных сигналов и простые как схемную, так и программную реализации, но требует применения двух счётчиков с большой разрядностью и выполнения операций деления и сравнения с числами с плавающей запятой.

Применение сигма-дельта модулятора [2; 6] для деления частоты обеспечивает формирование выходных сигналов, аналогичных делителю на счётчиках [8]. При этом используется только одна простейшая арифметическая операция сложения дробных чисел и одна промежуточная переменная [5]. В [9] также показано, что схема на сигма-дельта модуляторе самая простая и наименее требовательная к вычислительным ресурсам.

Общий недостаток всех рассмотренных схем заключается в скачках (джиттерах) периода при работе с дробными коэффициентами деления [11]. Схемы на счётчиках и на сигма-дельта модуляторе обеспечивают минимальный период последовательности выходных сигналов, минимальное изменение длительности паузы выходных сигналов, равное одному периоду входного сигнала.

В связи с указанным недостатком описанных схем заслуживают внимания схемы делителей частоты с коэффициентами $3/2$ и $5/2$ [3], которые формируют выходные сигналы без скачков их периода. Эти же схемы используются для формирования сигналов с коэффициентом деления 3 и 5 (в два раза выше заданного коэффициента деления), но со скважностью выходных сигналов равной 2. Алгоритмы формирования выходных сигналов рассмотренных схем различны, что не позволяет использовать рассмотренные схемы в качестве универсальных делителей с переменным коэффициентом деления. Кроме того, рассмотренные схемы достаточно сложны, содержат кроме относительно большого количества комбинационных и последовательностных логических схем ещё и дополнительную схему логического автомата.

Таким образом, традиционно используемые цифровые делители частоты показывают хорошие результаты при целочисленных коэффициентах деления, а также при некоторых дробных,

но неизменных коэффициентах деления: они обеспечивают стабильную частоту выходных сигналов при достаточно простой схеме или алгоритме работы [3; 7]. Но для решения задачи проектирования делителя частоты с переменным коэффициентом деления, а также для реализации других дробных коэффициентов применение этих схем и алгоритмов не представляется возможным [8]. Поэтому задача разработки схемы или алгоритма работы делителя частоты цифровых сигналов с переменным и произвольным коэффициентом деления остаётся актуальной задачей как в современной цифровой технике, так и в системах автоматического управления, решению которой посвящена настоящая статья. Результаты разработок авторов опробовались в программных пакетах SimInTech, OWEN Logic (с программированием ПЛК ОВЕН-ПР200 и исследованием его работы).

Модернизированный делитель частоты с сигма-дельта модулятором. В вышерассмотренных схемах представляет интерес принцип формирования фронтов выходных сигналов с использованием как переднего, так и заднего фронтов входного сигнала, в отличие от формирования выходных сигналов путём пропуска или задерживания входных сигналов. Заслуживает внимания использование выходного T -триггера для формирования выходных меандровых импульсов, но с коэффициентом деления в два раза выше заданного коэффициента. Поэтому в работе была проведена модернизация схемы и алгоритма работы делителя частоты на основе сигма-дельта модулятора с формированием фронтов выходных сигналов как по переднему, так и по заднему фронтам входного сигнала для уменьшения джиттера периода выходного сигнала при сохранении простоты и универсальности схемы. Рассматриваемая схема (см. рис. 1) содержит схему делителя на сигма-дельта модуляторе и схему опережения генерации (смещения) выходного сигнала на половину периода входного сигнала CLK. Коэффициент деления данной схемы задаётся в виде отношения натуральных чисел $k = \frac{N}{M}$.

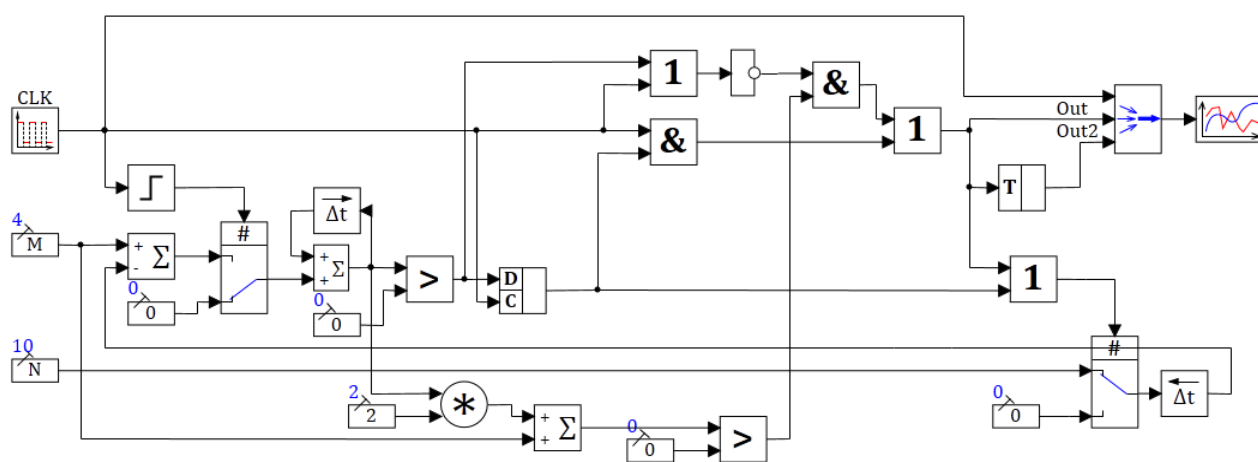


Рис. 1. Схемы делителя частоты с модифицированным сигма-дельта модулятором в программе SimInTech

Анализ работы разработанной схемы делителя частоты. Результаты работы разработанной схемы (сигналы на выходах Out и Out2) в сравнении с результатами работы схемы на стандартном сигма-дельта модуляторе (сигнал Out SDM) представлены на рис. 2.

Анализ результатов работы показывает, что при работе с целочисленными коэффициентами деления (см. рис. 2, а, е, и, к) выходные сигналы обеих сравниваемых схем одинаковы, за исключением сдвига сигнала разработанной схемы на 0,5 периода сигнала CLK. Выходные импульсы следуют с одинаковым периодом, равным $T_{out} = kT_{CLK}$, где T_{out} – период выходных сигналов; T_{CLK} – период входных сигналов; k – коэффициент деления частоты.

При работе с дробными коэффициентами деления схема на стандартном сигма-дельта модуляторе не обеспечивает постоянства периода выходных сигналов – период каждого элементарного выходного сигнала принимает одно из двух значений: $T_{out} = k'T_{CLK}$ или $T_{out} = (k' + 1)T_{CLK}$,

где k' – целая часть заданного коэффициента деления. То есть джиттер периода составляет величину T_{CLK} . Период последовательности сигналов минимален и равен числителю коэффициента деления, представленного в виде неправильной несокращаемой дроби. Количество джиттеров за период зависит от величины коэффициента деления и для представленных на рис. 2 значений изменяется от 0 до 6. Схема на модернизированном сигма-дельта модуляторе обеспечивает постоянство частоты выходных сигналов для дробного коэффициента деления $k = \frac{n}{2}$, где n – натуральное число. Для коэффициентов деления $k = \frac{n}{m}$, где m – чётное число, рассматриваемая схема обеспечивает период последовательности выходных импульсов в 2 раза меньше по сравнению со схемой на стандартном сигма-дельта модуляторе. Для остальных исследованных коэффициентов деления эта схема обеспечивает величину джиттера периода выходных сигналов в два раза меньше, чем стандартная схема ($\frac{T_{CLK}}{2}$). Разработанная схема по сложности и ресурсоёмкости не сильно отличается от базовой схемы на сигма-дельта модуляторе: в схеме дополнительно используются 5 логических элементов, компаратор, сумматор, блок умножения на 2 и T -триггер (при необходимости формирования меандрового выходного сигнала).

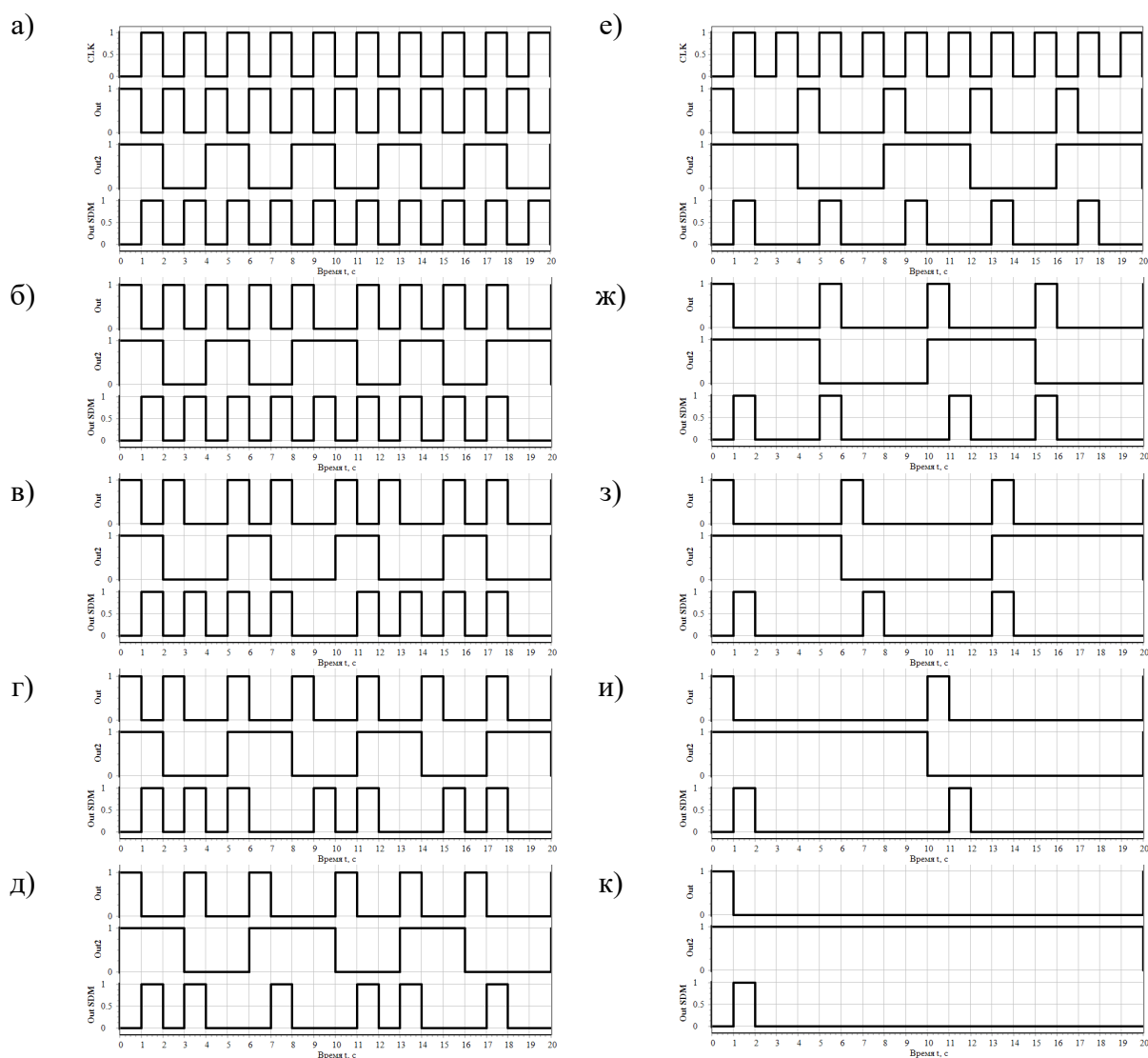


Рис. 2. Диаграммы работы делителя частоты с модифицированным сигма-дельта модулятором с коэффициентами деления: а – 1; б – 10/9; в – 5/4; г – 10/7; д – 5/3; е – 2; ж – 5/2; з – 10/3; и – 5; к – 10

Выводы. Модернизация схемы делителя частоты путём введения блока предсказания следующего значения выходного сигнала позволила смещать фронты выходного сигнала на половину периода сигнала синхронизации. В результате удалось уменьшить джиттер периода выходных сигналов вдвое – до половины периода входного сигнала. При работе с коэффициентами деления вида $k = \frac{n}{2}$, где n – натуральное число, модернизированная схема позволяет полностью избавиться от джиттеров частоты, как и при работе с целочисленными коэффициентами деления. При работе с коэффициентами деления вида $k = \frac{n}{m}$, где m – чётное число, модернизированная схема позволяет уменьшить период выходных сигналов в два раза. Применение в схеме делителя дополнительного выходного T -триггера позволяет получать на выходе сигналы меандрового типа, но в два раза меньшей частоты. Разработанная схема по сложности и ресурсоёмкости не сильно отличается от базовой схемы делителя на сигма-дельта модуляторе. Разработанный алгоритм и схема делителя успешно опробованы в ПЛК ОВЕН ПР-200, в программе SimInTech.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дингес, С. Делители частоты. Ч. 1. Основные сведения о делителях частоты / С. Дингес, В. Кочемасов // Компоненты и технологии. – 2019. – № 2 (211). – С. 6-16.
2. Колесников, Д. В. Анализ характеристик verilog-модели сигма-дельта модулятора / Д. В. Колесников, Е. Н. Бормонтов, Е. В. Небезин // Энергия – XXI век. – 2012. – № 1-2 (82-83). – С. 58-63.
3. Организация делителя частоты с дробным коэффициентом деления в объёме ПЛИС // Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/articles/306132/> (дата обращения: 15.01.2025). – Текст: электронный.
4. Проектирование электромеханического привода беспилотного летательного аппарата / М. А. Ефремов, А. А. Ткачук, Д. Я. Монастырский [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 82-92.
5. Способ анализа работы сигма-дельта модулятора во временной области / И. Я. Апкаев, О. И. Лазарева, К. Ю. Пискаев, М. С. Хитрых // Современные информационные технологии. – 2022. – № 35 (35). – С. 57-62.
6. Толкачев, П. А. Анализ сигма-дельта модулятора / П. А. Толкачев // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 5. – С. 38-42.
7. Тыщук, Ю. Н. Разработка цифрового делителя частоты с дробным коэффициентом деления в 130 нм sige BiCMOS технологии / Ю. Н. Тыщук, А. С. Кожемякин, А. Г. Говенько // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2019. – № 2. – С. 142.
8. Управление драйвером шагового электродвигателя с помощью цифрового делителя частоты с переменным дробным коэффициентом деления / А. В. Фролов, А. Е. Савин, Н. С. Нестерова, С. М. Жданова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 53-62.
9. Фролов, А. В. Цифровой делитель частоты импульсных сигналов с дробным коэффициентом деления / А. В. Фролов, А. В. Боцманов, Г. Е. Шевченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 366-373.
10. Хрульков, В. Н. Особенности реализации нечётких алгоритмов управления на базе программируемых логических контроллеров / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 52-62.
11. Шахтарин, Б. И. Анализ сигма-дельта модулятора / Б. И. Шахтарин, А. А. Быков, А. А. Ковальчук // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012. – № 1. – С. 28.



Чернышов А. Д., Горяйнов В. В.
A. D. Chernyshov, V. V. Goryainov

НАПРЯЖЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЕ, ЗАКРЕПЛЁННОЙ В НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ

STRESSES IN A RECTANGULAR MEMBRANE FIXED IN AN INCLINED PLANE UNDER ALTERNATING LOAD

Чернышов Александр Данилович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики Воронежского государственного университета инженерных технологий (Россия, Воронеж).
Alexander D. Chernyshov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Higher Mathematics Department, Voronezh State University of Engineering Technologies (Russia, Voronezh).

Горяйнов Виталий Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и механики Воронежского государственного технического университета (Россия, Воронеж).
Vitaly V. Goryainov – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Applied Mathematics and Mechanics Department, Voronezh State Technical University (Russia, Voronezh).

Аннотация. Построено точное решение задачи о прогибах прямоугольной мембраны, закреплённой в наклонной плоскости, под действием переменной нагрузки. Приводится анализ распределения напряжений в мембране, из которого следует, что изменение формы мембраны с квадратной на прямоугольную приводит к изменению количества точек с $\tilde{\sigma}_{\max}$ и увеличению значения $\tilde{\sigma}_{\max}$.

Summary. The exact solution of the problem of deflections of a rectangular membrane fixed in an inclined plane under the action of a variable load is constructed. An analysis of the stress distribution in the membrane is presented, from which it follows that changing the shape of the membrane from square to rectangular leads to a change in the number of points with $\tilde{\sigma}_{\max}$ and an increase in the value of $\tilde{\sigma}_{\max}$.

Ключевые слова: прогиб мембраны, прямоугольная мембрана, компоненты напряжений, переменная нагрузка, точное решение, уравнение Пуассона, быстрые разложения.

Key words: membrane deflection, rectangular membrane, stress components, alternating load, exact solution, Poisson equation, fast expansions.

Статья рекомендована к публикации оргкомитетом III научной конференции с международным участием «Вычислительные технологии и прикладная математика», проведённой 7-11 октября 2024 г. на базе Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

УДК 539.3+517.95

Введение. В качестве пространственных тонколистовых металлических конструкций покрытия используют мембраны [1]. При решении задачи о прогибах мембраны чаще всего рассматривается жёстко закреплённый контур мембраны, расположенный в горизонтальной плоскости [2–4]. В данной работе будем определять прогибы прямоугольной мембраны, закреплённой в наклонной плоскости, под действием переменной нагрузки.

Решение задачи и анализ результатов. Прогибы мембраны описываются уравнением Пуассона:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + F(x, y) = 0, \quad (x, y) \in \Omega_{\square}, \quad 0 \leq x \leq a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad (1)$$

где $F(x, y)$ нагрузка на мембрану.

Граничные условия зададим в виде

$$w|_{x=0} = f_1(y), \quad w|_{y=0} = f_2(x), \quad w|_{x=a} = f_3(y), \quad w|_{y=b} = f_4(x). \quad (2)$$

Решение краевой задачи (1), (2) должно удовлетворять условиям согласований:

$$\begin{aligned} f_1(0) = f_2(0), \quad f_2(a) = f_3(0), \quad f_3(b) = f_4(a), \quad f_1(b) = f_4(0), \\ w_{xx}(0,0) + w_{yy}(0,0) + F(0,0) = 0, \quad w_{xx}(a,0) + w_{yy}(a,0) + F(a,0) = 0, \\ w_{xx}(0,b) + w_{yy}(0,b) + F(0,b) = 0, \quad w_{xx}(a,b) + w_{yy}(a,b) + F(a,b) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Равенства (3) следуют из независимости величины прогибов $w(x, y)$ от направления подхода к этим углам.

Функцию $w(x, y)$ представим конечным выражением в виде суммы граничной функции второго порядка и ряда Фурье по синусам, в котором учтены два коэффициента Фурье [4, 5]:

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^4 A_i(y) P_i(x) + A_5(y) \sin \pi \frac{x}{a} + A_6(y) \sin 2\pi \frac{x}{a}, \quad 0 \leq x \leq a, \quad (4)$$

$$A_i(y) = \sum_{j=1}^4 A_{i,j} P_j(y) + A_{i,5} \sin \pi \frac{y}{b} + A_{i,6} \sin 2\pi \frac{y}{b}, \quad i = 1 \dots 6, \quad 0 \leq y \leq b,$$

$$P_1(y) = 1 - \frac{y}{b}, \quad P_2(y) = \frac{y}{b}, \quad P_3(y) = \frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{6b} - \frac{by}{3}, \quad P_4(y) = \frac{y^3}{6b} - \frac{by}{6},$$

$$P_1(x) = 1 - \frac{x}{a}, \quad P_2(x) = \frac{x}{a}, \quad P_3(x) = \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6a} - \frac{ax}{3}, \quad P_4(x) = \frac{x^3}{6a} - \frac{ax}{6}.$$

В работе [4] приведено точное решение краевой задачи (1), (2) в общем виде, выраженное через постоянные коэффициенты, входящие в выражение нагрузки $F(x, y)$ и функций $f_1(y)$, $f_2(x)$, $f_3(y)$, $f_4(x)$ из граничных условий (2). Подбирая определённым образом значения этих постоянных коэффициентов, можно задать конкретный вид граничных условий и нагрузки $F(x, y)$. Для задания положения прямоугольной мембраны в наклонной плоскости запишем граничные условия линейным законом:

$$\begin{aligned} w|_{x=0} = f_1(y) = w_1 P_1(y) + w_2 P_2(y), \quad w|_{y=0} = f_2(x) = w_1 P_1(x) + w_3 P_2(x), \\ w|_{x=a} = f_3(y) = w_3 P_1(y) + w_4 P_2(y), \quad w|_{y=b} = f_4(x) = w_2 P_1(x) + w_4 P_2(x), \end{aligned} \quad (5)$$

где w_i , $i = 1 \dots 4$ – прогибы в углах прямоугольной мембраны.

В этом случае переменная нагрузка будет иметь вид

$$\begin{aligned} F(x, y) = (Q_1 P_3(y) + Q_2 P_4(y)) P_1(x) + (Q_3 P_3(y) + Q_4 P_4(y)) P_2(x) + \\ + (Q_1 P_1(y) + Q_2 P_2(y)) P_3(x) + (Q_3 P_1(y) + Q_4 P_2(y)) P_4(x). \end{aligned} \quad (6)$$

В результате получим точное решение задачи (1), (2) в виде (4) для куполообразной нагрузки (6) и граничных условий (5):

$$\begin{aligned} w(x, y) = (w_1 P_1(y) + w_2 P_2(y)) P_1(x) + (w_3 P_1(y) + w_4 P_2(y)) P_2(x) - \\ - (Q_1 P_3(y) + Q_2 P_4(y)) P_3(x) - (Q_3 P_3(y) + Q_4 P_4(y)) P_4(x). \end{aligned}$$

В качестве материала мембраны выберем конструкционную углеродистую сталь обыкновенного качества марки ВСтЗпс [1] со следующими характеристиками [5]: $R_y = 2,35 \cdot 10^8$ Па, $\nu = 0,25$, $E = 2,13 \cdot 10^{11}$ Па, где R_y – расчётное сопротивление материала мембраны.

Значения параметров a , b , Q_i , w_i , $i = 1 \dots 4$ подбирались так, чтобы напряжения не превосходили расчётное сопротивление материала мембраны при двухосном напряжённом состоянии [1, 3]:

$$\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2} = \tilde{\sigma} \leq R_y, \quad (7)$$

где

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x), \quad \varepsilon_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2, \quad \varepsilon_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2.$$

Значения $\tilde{\sigma}_{\max}$, рассчитанные по формуле (7) при различных значениях a , b и $w_1 = w_2 = 0,011$, $w_3 = w_4 = 0,0113$, $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 4 \cdot 10^{-2}$, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения $\tilde{\sigma}_{\max}$ в мембранах одинаковой площади и различном отношения a/b при удлинении горизонтальной стороны

Размеры мембраны, м	$a = b = 1$	$a = 1/2, b = 2$	$a = 1/3, b = 3$	$a = 1/4, b = 4$
Значение $\tilde{\sigma}_{\max}$, Па	$0,80 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^6$	$7,2 \cdot 10^6$	$1,28 \cdot 10^7$
Количество точек с $\tilde{\sigma}_{\max}$	1	1	1	1
Координаты точек с $\tilde{\sigma}_{\max}$	$(a; b/2)$	$(a; b/2)$	$(a; b/2)$	$(a; b/2)$

Таблица 2

Значения $\tilde{\sigma}_{\max}$ в мембранах одинаковой площади и различном отношения a/b при удлинении наклонной стороны

Размеры мембраны, м	$a = b = 1$	$a = 2, b = 1/2$	$a = 3, b = 1/3$	$a = 4, b = 1/4$
Значение $\tilde{\sigma}_{\max}$, Па	$0,80 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$	$5,7 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^7$
Количество точек с $\tilde{\sigma}_{\max}$	1	2	2	2
Координаты точек с $\tilde{\sigma}_{\max}$	$(a; b/2)$	$(a/2; b)$ $(a/2; 0)$	$(a/2; b)$ $(a/2; 0)$	$(a/2; b)$ $(a/2; 0)$

Заключение. Если прямоугольная мембрана закреплена в наклонной плоскости, то габаритные размеры мембраны влияют на количество точек с максимальным напряжением $\tilde{\sigma}_{\max}$ и на величину $\tilde{\sigma}_{\max}$. У квадратной мембраны имеется одна точка с $\tilde{\sigma}_{\max}$, расположенная в середине одной из сторон. У прямоугольной мембраны количество точек с $\tilde{\sigma}_{\max}$ зависит от того, какая из сторон удлиняется – горизонтальная или наклонная. Возможны два варианта расположения точек:

1. две точки – в серединах двух длинных сторон $(a/2; b)$ $(a/2; 0)$ (см. табл. 2);
2. одна точка – в середине одной длинной стороны $(a; b/2)$ (см. табл. 1).

Также в ходе вычислительных экспериментов установлено, что наименьшие напряжения $\tilde{\sigma}_{\max}$ из всех возможных отношений a/b наблюдаются у квадратной мембраны (см. табл. 1 и 2). Если в качестве металлических конструкций покрытия необходимо использовать прямоугольную

мембрану, то с целью уменьшения в ней напряжений её наклонная сторона должна быть длиннее горизонтальной (см. табл. 1 и 2), а габаритные размеры должны быть приближены к квадратным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еремеев, П. Г. Пространственные тонколистовые металлические конструкции покрытий / П. Г. Еремеев. – М.: Изд-во ассоциации строительных вузов, 2006. – 560 с.
2. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
3. Тимошенко, С. П. Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
4. Применение быстрых разложений для построения точных решений задачи о прогибе прямоугольной мембраны под действием переменной нагрузки / А. Д. Чернышов, В. В. Горяйнов, С. Ф. Кузнецов [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2021. – № 70. – С. 127-142.
5. Чернышов, А. Д. Метод быстрых разложений для решения нелинейных дифференциальных уравнений / А. Д. Чернышов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2014. – Т. 54. – № 1. – С. 13-24.
6. Сталь марки ВСт3пс // Центральный металлический портал. – URL: http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/VSt3ps (дата обращения: 24.10.2024). – Текст: электронный.

МАШИНОСТРОЕНИЕ MACHINERY

Сысоев О. Е., Марьин С. Б., Сысоев Е. О.
O. E. Sysoev, S. B. Maryin, E. O. Sysoev

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

PREDICTION OF THE RESISTANCE PERIOD OF END MILLS WHEN PROCESSING HIGH-HARD MATERIALS

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: fks@knastu.ru.

Oleg E. Sysoev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: fks@knastu.ru.

Марьин Сергей Борисович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Авиационное строительство» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: as@knastu.ru.

Sergey B. Maryin – Doctor of Technical Sciences, Head of Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: as@knastu.ru.

Сысоев Евгений Олегович – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: fks@knastu.ru.

Evgeniy O. Sysoev – PhD in Economics, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: fks@knastu.ru.

Аннотация. При изготовлении деталей современных машин и механизмов, которые должны обладать высокой прочностью, используется дорогой высокопрочный инструмент. При разработке технологии изготовления таких деталей важно прогнозировать период износа инструмента для обеспечения качества изготавливаемых деталей и эффективного использования высокопрочного инструмента. В статье рассмотрены результаты прогнозирования периода стойкости торцовых фрез с покрытиями при обработке высокотвёрдого слоя заготовок деталей.

Summary. In the manufacture of parts of modern machines and mechanisms that must have high strength, expensive high-strength tools are used. When developing the technology for manufacturing such parts, it is important to predict the tool wear period to ensure the quality of the manufactured parts and the effective use of high-tech tools. The article discusses the results of predicting the durability period of end mills with coatings when processing a high-hardness layer of work pieces.

Ключевые слова: монолитные концевые фрезы с покрытиями, высокотвёрдые слои заготовок деталей, период стойкости до износа.

Key words: coated monolithic end mills, highly hard layers of workpieces, wear life.

УДК 621.9

Введение. Современная экономика требует всё более высокопроизводительных машин и механизмов, детали которых испытывают большие силовые и температурные нагрузки. Для уменьшения габаритов и материалоёмкости таких деталей их выполняют путём повышения твёрдости поверхностного слоя по отношению к слою основы. Технология получения поверхностного слоя с высокой прочностью может быть реализована нанесением слоя способом оплавления специальных порошковых проволок [1–4] или применением статико-импульсного упрочнения типового конструкционного материала [5–7]. Такой поверхностный слой, обладающий высокой твёрдостью,

достью HRC 65 и выше, обладает повышенной износостойкостью и при изготовлении деталей требует инструмент, обладающий высокой работоспособностью [8–10].

Однако при разработке технологии изготовления таких деталей технологам необходимо прогнозировать период стойкости обрабатывающего инструмента, т. к. при недопустимом износе инструмента во время выполнения технологической операции высока вероятность получения бракованной детали.

Обсуждение полученных результатов. Для проведения экспериментов использовалась основа из стали 45 твёрдостью HRC 50 после закалки (см. рис. 1), на которую были нанесены наплавка с шагом 1,5 мм, сплошная наплавка, двойная наплавка. Поверхностное наплавление проводилось порошковой проволокой марки ПП-АН167 в соответствии с ТУ У28.7-2149243-021.2008 [1].

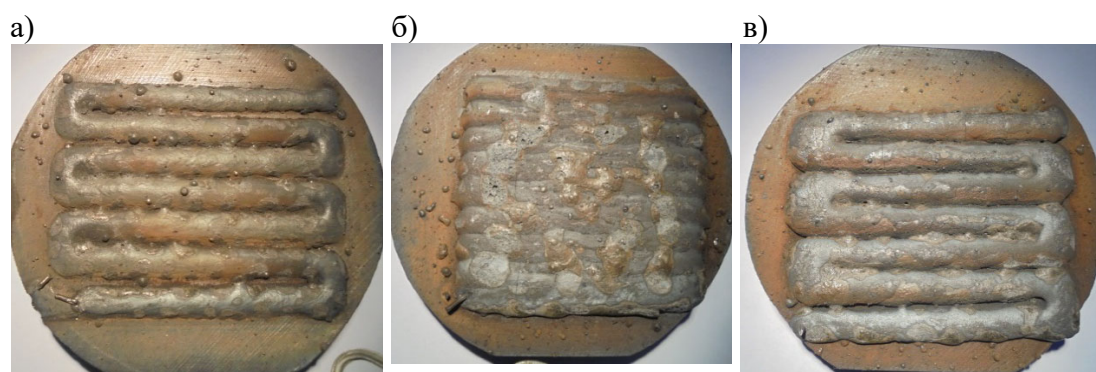


Рис. 1. Образцы с высокотвёрдыми наплавками: а – с разрядкой между слоями наплавки; б – сплошная наплавка; в – с двойной по высоте наплавкой

Следует отметить некоторые особенности: во-первых, основа для нанесения наплавки была изготовлена из стали 45 и после закалки имела твёрдость HRC 50; во-вторых, был обнаружен разброс прочности в наплавке сразу после её остывания до комнатной температуры в пределах от HRC 63 до HRC 68, а после механической обработки поверхностного слоя с глубиной резания 1...2 мм, скоростью резания 50 м/мин, подачей 30 мм/мин разброс прочности в наплавке обнаружен не был.

Также следует отметить большое влияние на период стойкости используемых концевых монолитных фрез до достижения износа 0,5 мм (см. табл. 1). В эксперименте фрезерование выполнено при скорости резания 50 м/мин, подаче 30 мм/мин.

Таблица 1

Износостойкость монолитной концевой фрезы T73748Q TA Z161A 10mm 16с 50L0751RTA 4FL STUB Z-CARB диаметром 10 м с четырьмя зубьями в зависимости от используемого покрытия

Покрытие на инструментальном материале	Период стойкости инструмента, мин
Глубина резания 1 мм	
Без покрытия	4
TiCN + TiN	6
(TiAl)N + Al ₂ O ₃ + (TiAl)N + Al ₂ O ₃	9
TiCN + (TiAl)N + Al ₂ O ₃ + TiC	12
Глубина резания 2 мм	
Без покрытия	3
TiCN + TiN	5
(TiAl)N + Al ₂ O ₃ + (TiAl)N + Al ₂ O ₃	7
TiCN + (TiAl)N + Al ₂ O ₃ + TiC	10

Из данных табл. 1 следует, что с увеличением глубины резания износостойкость всех фрез снижается, а наиболее износостойкими являются фрезы с покрытием $\text{TiCN} + (\text{TiAl})\text{N} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$.

В дальнейшем экспериментально было определено влияние увеличения количества зубьев на фрезе на период стойкости инструмента при различных скорости резания и видах покрытий (см. рис. 2 и 3).

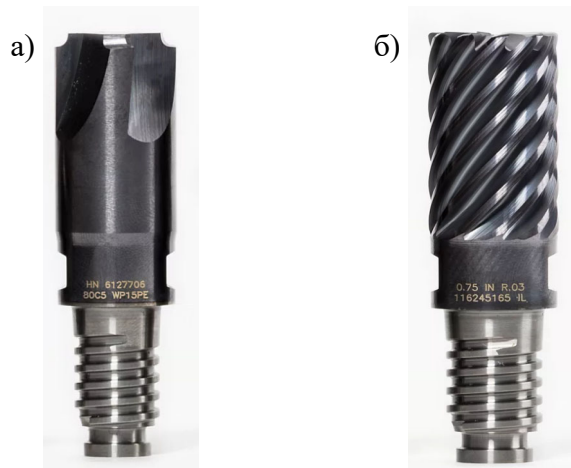


Рис. 2. Твердосплавные концевые фрезы: а – с четырьмя зубьями, б – с девятью зубьями

Анализ зависимостей на рис. 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. С увеличением скорости резания период стойкости инструмента уменьшается, при этом более работоспособны фрезы, имеющие многослойные наноструктурированные покрытия $(\text{TiAl})\text{N} + \text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{TiAl})\text{N} + \text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{TiCN} + (\text{TiAl})\text{N} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$.
2. Увеличение количества зубьев на фрезе влияет на период стойкости инструмента.

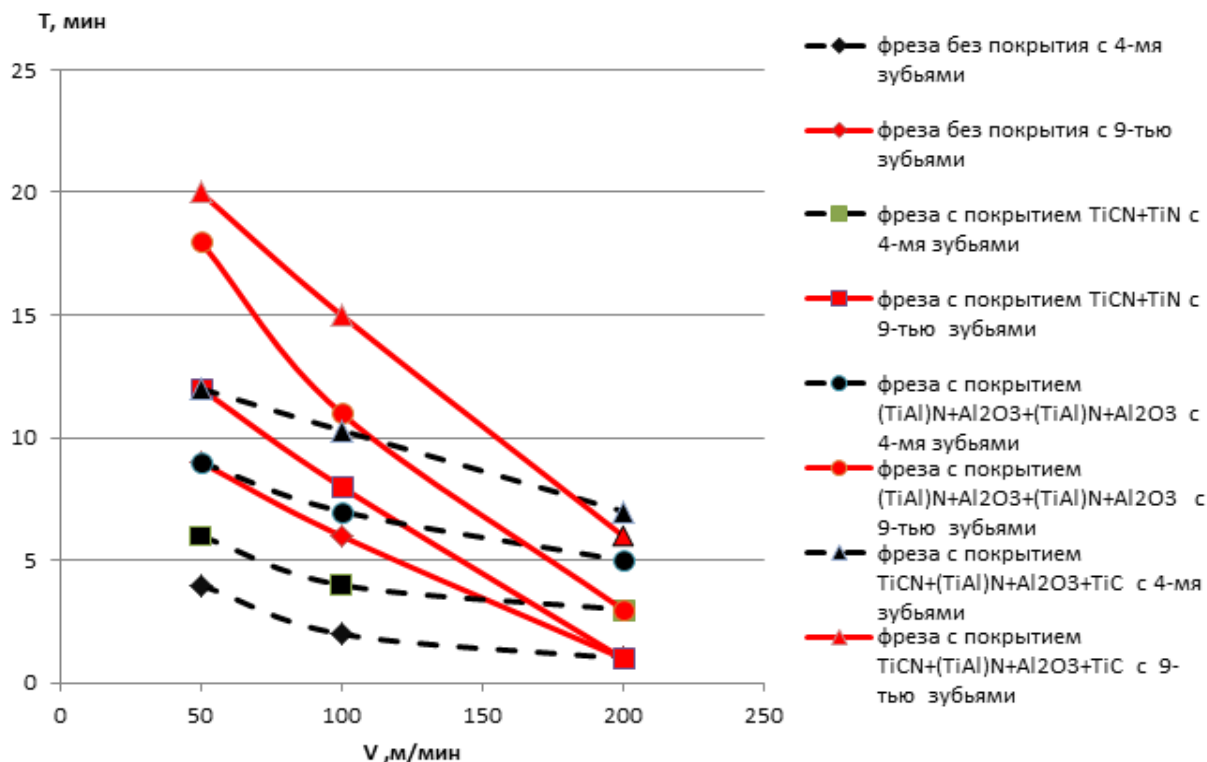


Рис. 3. Зависимости периода стойкости концевых фрез T от скорости резания V для фрез с различным числом зубьев и покрытий при глубине резания 1 мм

Заключение. Полученные зависимости периода стойкости концевых фрез от скорости резания позволяют прогнозировать период стойкости фрез с учётом применяемого покрытия, количества зубьев на фрезе при любой скорости резания. Такие зависимости необходимы для расчёта параметров технологического процесса при изготовлении ответственных деталей машин и механизмов, когда нельзя прерывать технологическую операцию для смены фрезы ввиду её износа. Одновременно такие зависимости позволяют полностью использовать период стойкости инструмента за счёт его точного прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, А. В. Статико-импульсная обработка и оснастка для её реализации / А. В. Киричек, А. Г. Лазуткин, Д. Л. Соловьёв // СТИН. – 1999. – № 6. – С. 20-24.
2. Мокрицкий, Б. Я. Лезвийная обработка упрочнённых материалов. Ч. 3. Обработка заготовок деталей, упрочнённых наплавками высокой твёрдости / Б. Я. Мокрицкий, Е. Б. Мокрицкая // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 11. – С. 493-497.
3. Мокрицкий, Б. Я. Управление фрезерованием высокотвёрдых заготовок / Б. Я. Мокрицкий, А. А. Скрипилёв // Вестник машиностроения. – 2022. – № 12. – С. 72-75.
4. Саблин, П. А. Высота микронеровностей и параметры шероховатости – комплексная оценка качества обработанной поверхности / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 90-94.
5. Остафьев, В. А. Учёт прочности инструмента при его проектировании и эксплуатации / В. А. Остафьев // Станки и инструмент. – 1983. – № 7. – С. 19-20.
6. Керамические покрытия на твёрдосплавном инструменте для точения нержавеющей труднообрабатываемых сталей / Б. Я. Мокрицкий, П. А. Саблин, В. В. Григорьев, В. Ю. Шелковников // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № III (67). – С. 82-90.
7. Космынин, А. В. Обеспечение качества обработки материалов резанием посредством внедрения трансформируемых управляемых звеньев в систему станочных систем / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, П. А. Саблин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V (45). – С. 115-118.
8. Deederich N. Metallischer Zwischenschichten im Bereich der Aufbanschneidesbildung. Ind. – Anz., 1968, 90, N 24, p. 457-460.
9. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of polu-atomic sustems using density-finctional theory // Comp. Phys. Commun. 1999. Vol. 119. P. 67-11.
10. Iochen M. Schneider. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti3Al. Phys. Rev. B 74, 174110, 2006.



Щетинин В. С., Космынин А. А.
V. S. Shchetinin, A. A. Kosmynin

ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ОТ ДОЛИ ПОРИСТОСТИ ИХ ЧАСТИЧНО ПОРИСТЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

DEPENDENCE OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF SPINDLE ASSEMBLIES ON THE POROSITY FRACTION OF THEIR PARTIALLY POROUS GAS-STATIC BEARINGS

Щетинин Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортно-технологические комплексы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(924)226-00-56. E-mail: schetynin@mail.ru.

Vladimir S. Shchetinin – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Complexes, Far Eastern State University of Railways (Khabarovsk, Russia); tel. 8(924)226-00-56. E-mail: schetynin@mail.ru.

Космынин Артем Александрович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)164-10-55. E-mail: avkosm@mail.ru.

Artem A. Kosmynin – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)164-10-55. E-mail: avkosm@mail.ru.

Аннотация. Рассмотрено влияние доли пористости частично пористых газостатических подшипников на выходные характеристики шпиндельного узла (ШУ) металлорежущего станка. Анализу подвергнуты нагрузочные и жёсткостные характеристики ШУ. В результате выполненного комплекса исследований сделан вывод о заметном влиянии на них доли пористости газостатических опор. В дальнейшем предложено искать инженерное решение по автоматическому регулированию доли пористости газостатических подшипников.

Summary. The influence of the porosity fraction of partially porous gas-static bearings on the output characteristics of the spindle assembly (SA) of a metal-cutting machine is considered. The load and stiffness characteristics of the SA are analyzed. As a result of the performed complex of studies, it was concluded that the proportion of porosity of gas-static supports had a noticeable effect on them. In the future, it is proposed to look for an engineering solution for automatic regulation of the porosity fraction of gas-static bearings.

Ключевые слова: доля пористости, газостатический подшипник, шпиндельный узел, нагрузочные и жёсткостные характеристики.

Key words: porosity fraction, gas-static bearing, spindle assembly, load and stiffness characteristics.

УДК 621.822.572.-405.8

Применение газостатических подшипников в шпиндельных узлах (ШУ) металлообрабатывающего оборудования позволяет существенно повысить их быстроходность и, соответственно, уменьшить время на обработку деталей. В настоящее время опубликовано много работ, посвящённых результатам исследований характеристик как газостатических подшипников, так и ШУ, в конструкции которых они используются. Тем не менее остаётся ещё ряд важных задач, которые выпали из поля зрения учёных.

Проведённые ранее исследования [1–6] показали, что выходные характеристики ШУ на газостатических опорах с частично пористой стенкой вкладыша, а именно нагрузка и жёсткость, измеренные на режущем инструменте, заметно зависят от ряда конструктивных параметров подшипников: длины и диаметра опоры; формы, размера и количества пористых вставок в ряду наддува и т. д. При этом практически открытым остаётся вопрос о влиянии доли пористости газовой опоры на собственные характеристики и на выходные характеристики ШУ в целом. Под долей пористости газостатической опоры \bar{S} понимается отношение суммарной площади пористых ограни-

чителей расхода к площади вкладыша подшипника, которая равна πDL , где D – диаметр вкладыша, L – длина подшипника.

В работе [4] выполнена оценка влияния на выходные характеристики ШУ конструктивных особенностей полностью пористых и частично пористых газостатических опор. Однако выполненный комплекс исследований не в полной мере раскрыл влияние доли пористости на исследуемые характеристики. Настоящая работа в какой-то мере восполняет этот пробел.

Когда влияние эффекта смазочного клина на эксплуатационные характеристики газостатических подшипников мало, что наблюдается при низкой частоте вращения шпинделя, выходные характеристики ШУ принято представлять в зависимости от безразмерного конструктивного параметра K_C , прямо пропорционального среднему радиальному зазору c :

$$K_C = c \cdot \sqrt[3]{\frac{\delta}{12 \cdot k_p \cdot R'}}$$

где δ – толщина пористой вставки; R – радиус опоры; k_p – коэффициент газопроницаемости материала пористой вставки.

Расчёт выходных характеристик ШУ на газостатических опорах с частично пористой поверхностью вкладыша выполнен при доле пористости \bar{S} равной 0,075, 0,113 и 0,151 по методике, изложенной в работе [4].

Зависимости относительной нагрузки \bar{F} на консоли шпинделя от доли пористости \bar{S} и конструктивного параметра K_C показаны на рис. 1.

Из представленных зависимостей видно, что практически во всём диапазоне изменения конструктивного параметра K_C наибольшая относительная нагрузка на выходном конце шпинделя \bar{F} достигается при значении доли пористости $\bar{S} = 0,151$, что является следствием увеличения общей площади пористой поверхности питания опоры газом. Прирост максимума относительной нагрузки \bar{F} , связанный с изменением доли пористости, составляет 24 % при изменении \bar{S} от 0,075 до 0,113 и только 5 % – при изменении \bar{S} от 0,113 до 0,151. Из этого следует вывод, что повышение пористой площади вкладышей ведёт к росту нагрузки на шлифовальном круге, однако он заметно замедляется при увеличении доли пористости.

Помимо этого, следует отметить, что с ростом доли пористости происходит смещение максимума нагрузочных характеристик в сторону увеличения конструктивного параметра.

Вторым главным выходным параметром шпиндельного узла является жёсткость, измеренная на режущем инструменте, от значения которой зависит точность обработки заготовки.

Жёсткость смазочного слоя газового подшипника J определим по формуле

$$J = dF/dy,$$

где F – нагрузка на режущем инструменте, y – смещение оси режущего инструмента.

Последнее выражение представим в виде

$$J = \frac{Q_{\max}}{c} k_J,$$

k_J – коэффициент жёсткости; Q_{\max} – максимальная теоретическая грузоподъёмность газовой опоры; c – средний радиальный зазор.

Проанализируем изменение коэффициента жёсткости газостатической опоры. На рис. 2 представлена зависимость коэффициента жёсткости k_J на режущем инструменте от доли пористости \bar{S} и конструктивного параметра K_C .

Из элементарного анализа представленных зависимостей можно сделать заключение, что увеличение доли пористости сопровождается ростом коэффициента жёсткости. Это связано тем, что при работе опоры в режиме подвеса с увеличением площади пористой поверхности наблюдается более интенсивный рост грузоподъёмности опоры с увеличением смещения шпинделя во вкладыше подшипника.

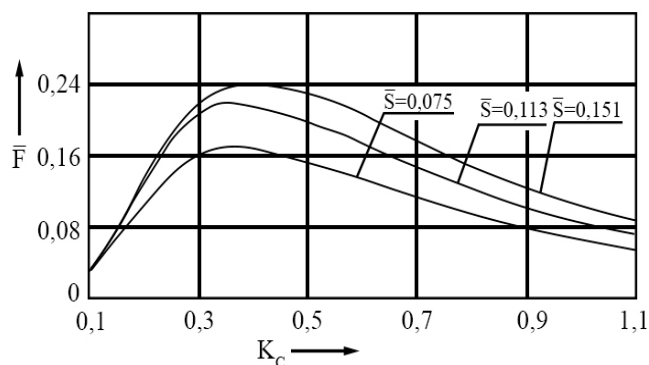


Рис. 1. Зависимости относительной нагрузки \bar{F} на консоли шпинделя от доли пористости \bar{S} и конструктивного параметра K_c

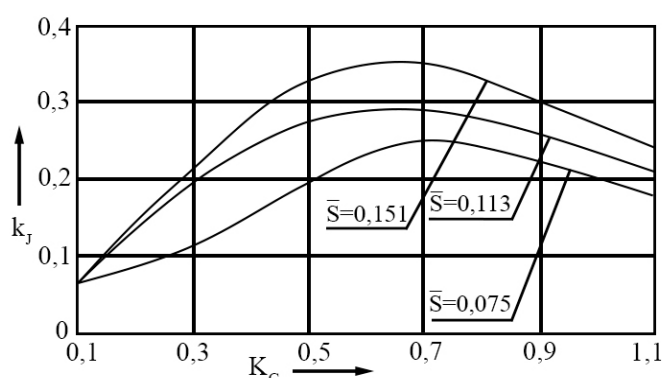


Рис. 2. Зависимость коэффициента жёсткости k_J на режущем инструменте от доли пористости \bar{S} и конструктивного параметра K_c

На основании выполненного анализа нагрузочных и жёсткостных характеристик ШУ можно сделать вывод о заметном влиянии на них доли пористости газостатических опор. Следовательно, необходимы дальнейшие поиски инженерного решения по осуществлению регулирования значения доли пористости газостатической опоры шпиндельного узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щетинин, В. С. Методика расчёта выходных характеристик шпиндельного узла на бесконтактных опорах с внешним наддувом газа / В. С. Щетинин, А. А. Космынин, С. Б. Марьин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № V (77). – С. 55-60.
2. Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем. Эксплуатация и проектирование: моногр. / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов, А. С. Хвостиков. – М.: Инфра-Инженерия, 2022. – 372 с.
3. Выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов на газовых опорах: моногр. / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, В. И. Шаломов [и др.]; под общ. ред. А. В. Космынина. – М.: Издательский дом «Академия Естествознания», 2011. – 178 с.
4. Частично пористые газостатические опоры шпиндельных узлов: теория и эксперимент: моногр. / А. В. Космынин, С. В. Виноградов, В. С. Виноградов [и др.]. – М.: Издательский дом «Академия Естествознания», 2011. – 125 с.
5. Шпиндельные узлы металлорежущих станков на опорах с внешним наддувом газа для финишной обработки отверстий малого диаметра / В. С. Щетинин, А. В. Космынин, А. В. Ульянов, А. А. Ваньков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-19. – С. 4192-4196.
6. Космынин, А. А. Зависимость выходных характеристик высокоскоростных шпиндельных узлов от площади частично пористой поверхности газостатических опор / А. А. Космынин, В. С. Щетинин // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2024. – С. 34-36.

Ри Э. Х., Приходько А. А., Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Чешев С. С.
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ
ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ МЕТОДОВ

Ри Э. Х., Приходько А. А., Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Чешев С. С.
E. H. Ri, A. A. Prikhodko, S. V. Dorofeev, A. R. Voynov, S. S. Cheshev

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ МЕТОДОВ

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPLEX-SHAPED CASTING CORES USING ADDITIVE METHODS FOR THE AVIATION INDUSTRY

Ри Эрнст Хосенович – доктор технических наук, профессор, руководитель Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 003232@togudv.ru.

Ernst Kh. Ri – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Higher School of Industrial Engineering at Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Region, Khabarovsk, 136, Tikhookeanskaya St., E-mail: 003232@togudv.ru.

Приходько Алексей Андреевич – заместитель технического директора – главный металлург ООО «ВР Литейное производство» (Россия, Арсеньев), аспирант Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: a.prikhodko@aacprogress.ru.

Aleksey A. Prikhodko – Deputy Technical Director – Chief Metallurgist of VR Foundry Production (Russia, Arsenyev), Postgraduate Student of the Higher School of Industrial Engineering of the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: a.prikhodko@aacprogress.ru.

Дорофеев Станислав Вячеславович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 005541@togudv.ru.

Stanislav V. Dorofeev – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 005541@togudv.ru.

Войнов Александр Робертович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 006326@togudv.ru.

Alexander R. Voinov – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 006326@togudv.ru.

Чешев Станислав Сергеевич – инженер отдела главного металлурга ООО «ВР Литейное производство» (Россия, Арсеньев), магистрант Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: stanislav.cheshev_03.09@mail.ru.

Stanislav S. Cheshev – Engineer of the Chief Metallurgist's Department of VR Foundry Production (Russia, Arsenyev), Master's Degree Student of the Higher School of Industrial Engineering of the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: stanislav.cheshev_03.09@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются преимущества и перспективы применения аддитивных технологий для изготовления стержней в авиационной промышленности, а также приводятся примеры успешного внедрения этих методов. Описан опыт применения аддитивных технологий при разработке сложной формообразующей литейной оснастки. Апробация изготовления стержней с применением Bed технологий BJ и SLS показала преимущества в точности и прочности. Система вентиляции пресс-форм литья под низким давлением улучшена применением полых SLS-стержней при газопроницаемости 20...25 ед. Тонкие SLS-



стержни переменного сечения изготовили полыми для максимальной эффективности отвода газов. Система вентиляции литейной формы дополнена, что позволило снизить количество газовых дефектов в отливках. Внедрение аддитивных технологий сократило время производства на 20...30 % и повысило качество отливок за счёт увеличения прочности и точности стержней. Годные отливки авиационных деталей теплонагруженных элементов из сплавов АЛ9 и АЛ9-1 получены способом литья под низким давлением с применением тонких стержней BJ и полых стержней SLS. По результатам внедрения разработанных технологических решений получено минимальное количество дефектов, литые заготовки соответствуют требованиям конструкторской и нормативной документации. Экспериментально подтверждено снижение количества дефектов в виде газовых раковин, пор и несплошностей вплоть до полного устранения дефектов по сравнению с прежней технологией. Результаты исследования показали применимость аддитивных технологий для изготовления сложных литейных стержней и могут быть использованы в других отраслях промышленности.

Summary. The article discusses the advantages and prospects of applying additive technologies to core manufacturing in the aviation industry, as well as provides examples of their successful implementation. It describes the experience of using additive technologies in the development of complex mold-forming casting tooling. Trials of core production using bed-based BJ (Binder Jetting) and SLS (Selective Laser Sintering) technologies demonstrated benefits in precision and strength. The ventilation system of low-pressure injection molds is improved by using hollow SLS cores, with a gas permeability of 20 – 25 units. SLS casting cores with variable cross-sections were made hollow to maximize gas venting efficiency. The ventilation system of the casting mold was enhanced, reducing gas-related defects in the castings. The adoption of additive technologies shortened production time by 20 – 30 % and improved casting quality by increasing the strength and precision of the cores. Sound castings of aviation components for thermally stressed elements made from AL9 and AL9-1 alloys were produced via the low-pressure casting method using hollow thin cores fabricated via BJ (Binder Jetting) and SLS (Selective Laser Sintering). The implementation of the developed technological solutions resulted in minimal casting defects, compliant with design and regulatory documentation requirements. A reduction in the number of defects in the form of gas shells, pores and discontinuities has been experimentally confirmed, up to the complete elimination of defects compared with the previous technology. The study's results demonstrate the applicability of additive technologies for manufacturing complex casting cores and suggest their potential for adoption in other industrial sectors.

Ключевые слова: аддитивные технологии, полые литейные стержни, стержни сложной конфигурации, авиационная промышленность, Binder Jetting, селективное лазерное спекание, газовые дефекты, экономическая эффективность, литьё под давлением, авиационные отливки, тонкостенные маслоканалы, сложная геометрия отливок, внутренние каналы для газоотвода, система газоотвода, снижение газовых дефектов, повышение качества отливок.

Key words: additive manufacturing, hollow casting cores, complex cores, aviation industry, Binder Jetting, Selective Laser Sintering, gas defects, cost-effectiveness, injection molding, aviation castings, thin-walled oil channels, complex casting geometry, internal gas venting channels, gas venting system, reducing gas defects, improving casting quality.

УДК 621.743

Введение. Разработка прогрессивных технологических процессов в машиностроительной отрасли – важная многокритериальная задача применения металлических сплавов с новым уровнем свойств и новых технологий для изготовления деталей из них.

Отечественная индустрия обладает одним из мощнейших в мире промышленных потенциалов авиастроительной отрасли. Для повышения конкурентоспособности на международном уровне необходимо не только развивать производственные мощности, но и внедрять инновационные материалы и технологии. Поднимать значения показателей мощности, надёжности и экономичности авиационных двигателей, превосходящих зарубежные аналоги, возможно при использовании современных литейных технологий [1–5]. Проблема конструкции литых деталей теплонагруженных элементов заключается в том, что изготавливать каждое изделие нужно с большим ко-

личеством охлаждающих каналов переменного сечения в точном соответствии с расчётами конструктора.

Разработка технологии изготовления элементов литейной формы и исследование применимости современных цифровых технологий, в том числе для специальных видов литья, являются актуальными задачами для литейного производства. Технология получения стержней играет ключевую роль в формировании внутренних полостей и каналов в сложных и ответственных отливках, что особенно критично для деталей авиационных газотурбинных двигателей, где геометрическая и размерная точность деталей и количество дефектов в них напрямую влияют на эксплуатационные характеристики изделий.

Традиционные методы изготовления стержней сталкиваются с ограничениями при создании стержней сложной геометрической формы, что приводит к увеличению времени производства, снижению точности и повышению затрат [4]. На стадии проектирования изготовления заготовок деталей наряду с созданием 3D-моделей отливок выполняется проектирование элементов литейной формы, в том числе получают отдельно 3D-модели стержней со стержневыми знаками, по размерам которых последовательно проектируют стержневые ящики, драйеры, знаковые части литейной формы и, при необходимости, кондукторы для сборки и простановки стержней в форму.

Аддитивные технологии, такие как Binder Jetting (BJ) и Selective Laser Sintering (SLS) [6–9], открывают новые возможности для производства стержней сложной конфигурации, что способствует оптимизации толщины стенок отливок при сохранении и улучшении эксплуатационных характеристик литых деталей. При изготовлении объёмных опочных и безопочных песчаных литейных форм расход формовочной смеси для этой технологии снижается до 70 %. Направления внедрения аддитивных технологий в литейное производство и практические примеры приведены в ряде современных исследований [10–12].

Практическая значимость проведённых исследований заключается в повышении качества отливок для авиационной промышленности из алюминиевых сплавов, полученных после апробации применения литейных стержней, изготовленных с применением Bed-технологий BJ и SLS.

Материалы и методы. В исследовании рассматривались перспективные методы изготовления стержней, которые разделили на две группы: традиционную и аддитивную. Сравнивали технологию холоднотвердеющих смесей (ХТС) и один из видов аддитивных технологий – Bed Deposition, который предполагает наличие поверхности («bed»), при использовании которой сначала формируют слой и затем выборочно фиксируют материал стержневой смеси в этом слое. Слой в технологии Bed Deposition формируют, насыпая на поверхность рабочей платформы 3D-принтера дозу порошкового материала, которую разравнивают, формируя ровный слой определённой толщины с помощью ролика или «ножа». Затем селективно обрабатывают порошок в сформированном слое лазером или иным способом, скрепляя склеиванием или сплавлением частички в соответствии с текущим сечением исходной CAD-модели.

Традиционные методы изготовления стержней условно представлены ХТС на основе фурановой смолы в качестве связующего компонента смеси (см. табл. 1). Этот метод требует проектирования и изготовления стержневых ящиков, что значительно увеличивает время, а также стоимость производства стержней, количество оснастки и контрольных операций. Точность изготовления стержней ХТС составляет $\pm 0,3$ мм, что ограничивает применение для деталей повышенного качества с полостями высокой сложности геометрии [13].

Аддитивные технологии, применявшиеся в экспериментальной разработке:

– Технология получения трёхмерных песчано-полимерных форм без модельного комплекта Ink-Jet или Binder Jetting (BJ) (оборудование изготавливают компании США ExOne, 3D Systems, KHP – FHZL) основана на смешивании огнеупорной основы, активатора-отвердителя (n-толуолсульфокислоты) с применением связующего материала ХТС (фурановые или фенольные смолы), когда во время печати активатор и песок равномерно перемешиваются, затем тонким слоем укладываются на платформу, а печатающая головка 3D-принтера точно распыляет связующее на нанесённый слой. Точность стержней составляет $\pm 0,2$ мм, что позволяет создавать более точные сложные геометрические формы по сравнению с традиционными методами изготовления [6; 7].



– Selective Laser Sintering (SLS) использует лазерное спекание песчаного или керамического порошка. С 2002 г. в КНР серийно производят промышленные аддитивные установки FHZL для печати литейных форм и стержней из песчано-полимерной смеси, а скорость 3D-печати зависит от скорости сканирования каждого слоя виртуальной модели. При изготовлении объёмных опочных и безопочных песчаных литейных форм расход формовочной смеси для этой технологии снижается до 70 % [8; 9].

Таблица 1

Сравнение технологий изготовления стержней

Показатель	ХТС технология на основе фурановых смол	Binder Jetting на основе фурановых смол	SLS (Селективное лазерное спекание)
Содержание компонентов, режимы	1K ₂ O ₂ 02 – 1K ₂ O ₂ 025 ГОСТ 2138-91 100 % Смола резольная НБ65 Ф ТУ 2016.55-1746-55778270-2019 – 1,1 % Катализатор SH5 ТУ 2016.55-1746-55778270-2019 – 50 % от смолы. Поставщик «Урлахимпласт-Хюттенес Альбертус»	1K ₁ O ₁ 01 ГОСТ 2138-91 100 % Отвердитель FHZL XY-90-2 2,8 мл/кг Смола FHZL XY-GS05. Режимы: 70 % открывания дюз; Толщина слоя 0,3 мм; Скорость 100 слоёв в час, размер бункера 1200×1000 мм	Песок плакированный «Long Yuan» средний размер зерна 0,09 мм Состав: SiO ₂ (≥95 %), Al ₂ O ₃ (≤2 %). Лазер мощностью 55 Вт, длина волны 10,6 мкм. Размер печати 500×500×500 мм Толщина слоя 0,08...0,35 Скорость построения 80...200 см ³ /ч
Оборудование	Смеситель непрерывного действия ХТС Mixer T36-30S	3D-принтер FHZL PCM1200 AJ	3D-принтер лазерного спекания AFS-500
Точность, мм	±0,3 мм	±0,2 мм	±0,1 мм
Толщина слоя, мм	–	0,2...0,3 мм	0,08...0,12 мм
Скорость изготовления	Высокая, (до 30 т/ч – зависит от размера стержневого ящика)	Средняя (до 10 000...15 000 см ³ /ч для крупных стержней)	Средняя (зависит от сложности, обычно 2000...5000 см ³ /ч)
Осыпаемость, % (<1 % ед. ГОСТ 23409.9-78)	0,5 %	0,7 %	0,2 %
Газопроницаемость, ед. (>15 ед. ГОСТ 23409.6-78)	23...27	20...25	20
Газотворность, см ³ /г (≤10 см ³ /г)	10...15	5...10	3...8
σ _и 2 часа, МПа (≥0,6 МПа ГОСТ 23409.7-78)	1,5...2,0	по оси: X – 1,765; Y – 1,548	2,8...2,9
σ _и 4 часа, МПа (≥1,5 МПа ГОСТ 23409.7-78)	2,0...2,5	по оси: X – 1,743; Y – 1,398	
σ _и 24 часа, МПа (≥1,5 МПа ГОСТ 23409.7-78)	2,5...3,0	по оси: X – 1,866; Y – 1,479	
Термостойкость, °С	200...250 °С, с защитным покрытием до 500...600 °С	200...250 °С, с защитным покрытием до 500...600 °С	300...350 °С, с защитным покрытием до 600...700 °С
Постобработка	Отверждение на воздухе для набора прочности	Отверждение в печи	Очистка внутренних каналов

Для литья экспериментальных деталей использовались сплавы АК7пч (АЛ9-1) с повышенными антифрикционными и механическими свойствами и АК7ч (АЛ9) с высокой устойчивостью к вибрациям и длительным нагрузкам [14]. При применении данных сплавов для литья под давлением допускается введение стронция до 0,08 % с целью модифицирования эвтектики для измельчения зерна. Содержание титана и каждого из прочих элементов, указанных в общей сумме примесей в ГОСТ 1583-93, не должно превышать значения 0,02 %. Подготовку сплавов проводили в индукционной тигельной печи. Для заливки применяли метод литья под низким давлением, который обеспечивает ламинарное заполнение формы, предотвращает завихрения и образование оксидных плёнок. Метод литья под давлением (ЛПД) превосходит другие методы литья по уровню механизации, производительности, точности размеров и минимизации дефектов отливок, исключая размытие форм и повреждение внутренних стержней [15].

Для контроля отливок использовались стандартизированные эффективные методы. На первом этапе проверки качества полученных отливок проводился визуальный контроль с использованием увеличительных приборов. Для контроля труднодоступных мест (внутренних поверхностей каналов и полостей) применяли видеоскоп LASERTECH VE 630, который позволяет исследовать внутренние поверхности каналов и полостей отливок для выявления дефектов, таких как газовые раковины и поры.

Для выявления внутренних дефектов в отливках проводился рентгеноскопический контроль с использованием аппарата Экстравольт-320. Рентгеновская компьютерная томография (РКТ) реализована с помощью промышленного томографа СТ-850XCSF для получения трёхмерных изображений внутренней структуры отливок там, где 2D-рентген даёт неубедительные результаты. РКТ позволяет выявлять по всему объёму дефекты (трещины, пустоты, включения), недоступные для определения отклонения геометрии другими методами контроля, а также автономно анализировать результаты и классифицировать детали на две группы: «годные» и «не годные». Результаты РКТ, помимо координатных измерений, можно сравнивать с воксельными данными САПР (STEP, IGES), сетками STL и анализировать в ПО VG Studio MAX.

Результаты и их обсуждение. Для подбора наиболее подходящей технологии изготовления стержней сложной конфигурации был проведён анализ современных методов [9; 16–19], используемых для отливок из алюминиевых сплавов. Данные для сравнительного анализа при выборе перспективных технологий представлены в табл. 1.

Практическое применение технологии ХТС для изготовления стержней сложной конфигурации с использованием стержневых ящиков имеет ряд ограничений:

- высокая трудоёмкость изготовления модельного комплекта, процесс проектирования и создания элементов влекут значительные затраты времени, а каждое изменение конструкции требует доработки элементов модельного комплекта;

- трудности извлечения стержней из стержневых ящиков без повреждения.

Примеры экспериментальных литых заготовок представлены на рис. 1 и 2. Стержни формируют в экспериментальных деталях литые маслослоканалы диаметром 6...28 мм, длиной 150...300 мм.

Цифровые методы производства позволяют быстро вносить изменения в конструкцию стержней без необходимости переделывать оснастку.

Толщина слоя при печати SLS составляет 0,08...0,12 мм и обеспечивает точность до $\pm 0,1$ мм. ВJ позволяет печатать до 100 слоёв в час, а SLS – до 200 см³/ч, что значительно сокращает время производства по сравнению с традиционными методами.

В ходе экспериментальных исследований были изготовлены ВJ-стержни, соответствующие всем требованиям конструкторской документации. Отверждение слоёв ВJ-стержней происходит без нагрева, поэтому связанных с этим напряжений и деформаций нет. Нагрев ВJ-стержней до 350 °С в печи применяют для окончательного отверждения, удаления жидкой составляющей связующей композиции, набора максимальной прочности и в целях снижения их газотворности при контакте с жидким металлом.

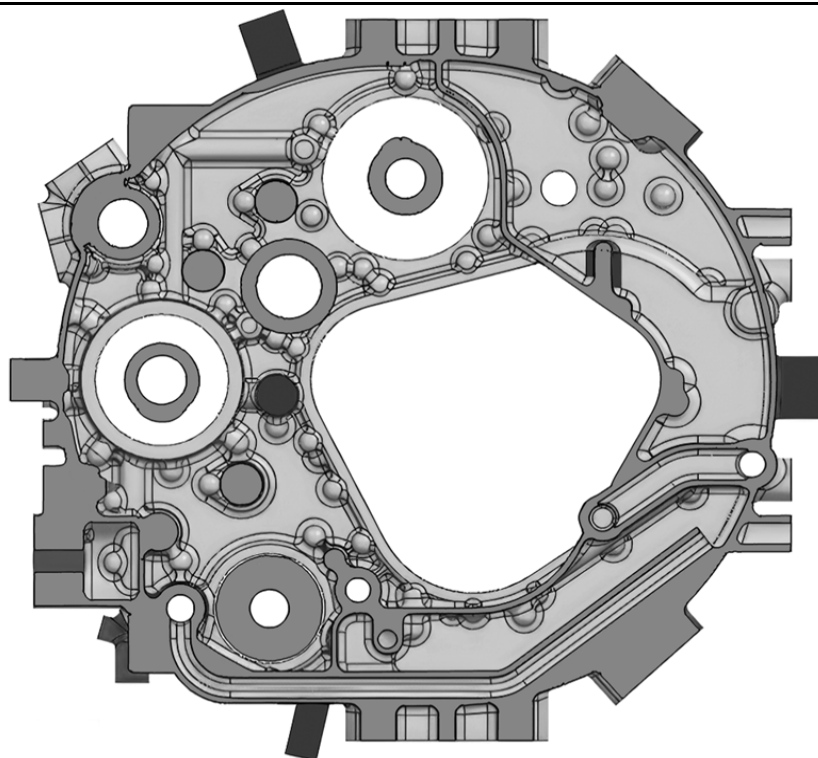


Рис. 1. Корпус редуктора (3D-модель отливки в разрезе)

Примеры конфигурации стержней и расположение их в пресс-форме для литья представлены на рис. 3 и 4.

После сборки на ВJ-стержень и литейную форму наносят специальный слой покрытия и высушивают с применением нагрева в печи.

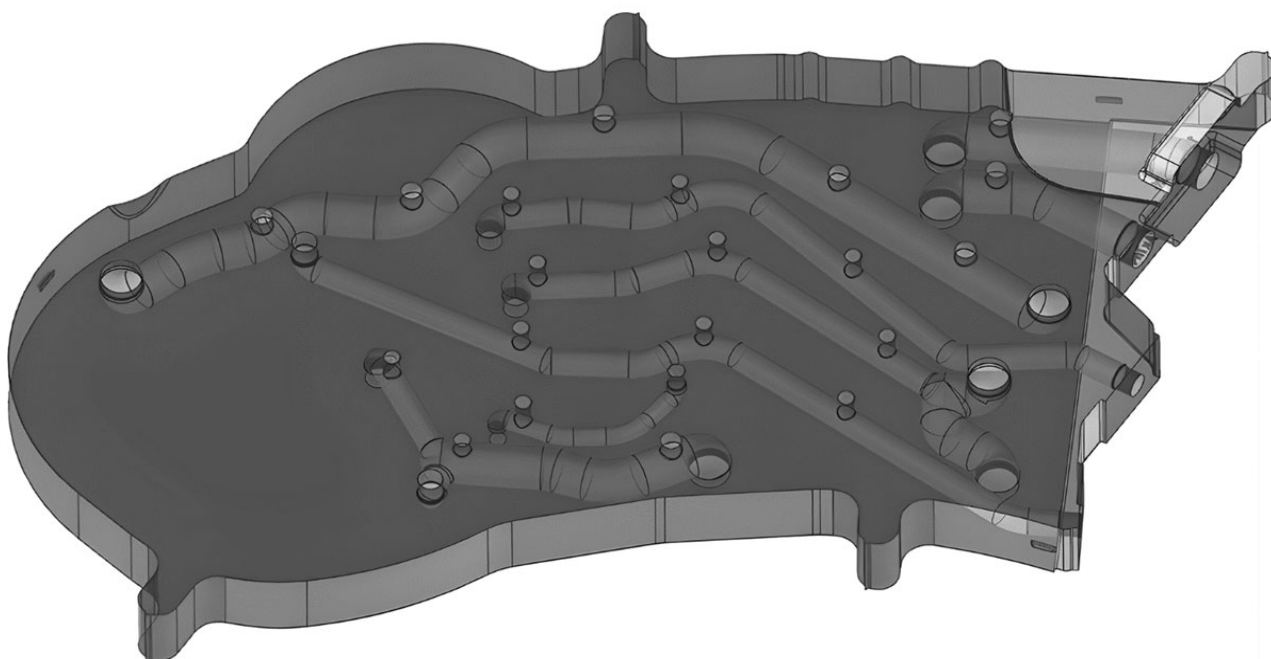


Рис. 2. Адаптер топливных агрегатов (3D-модель отливки)

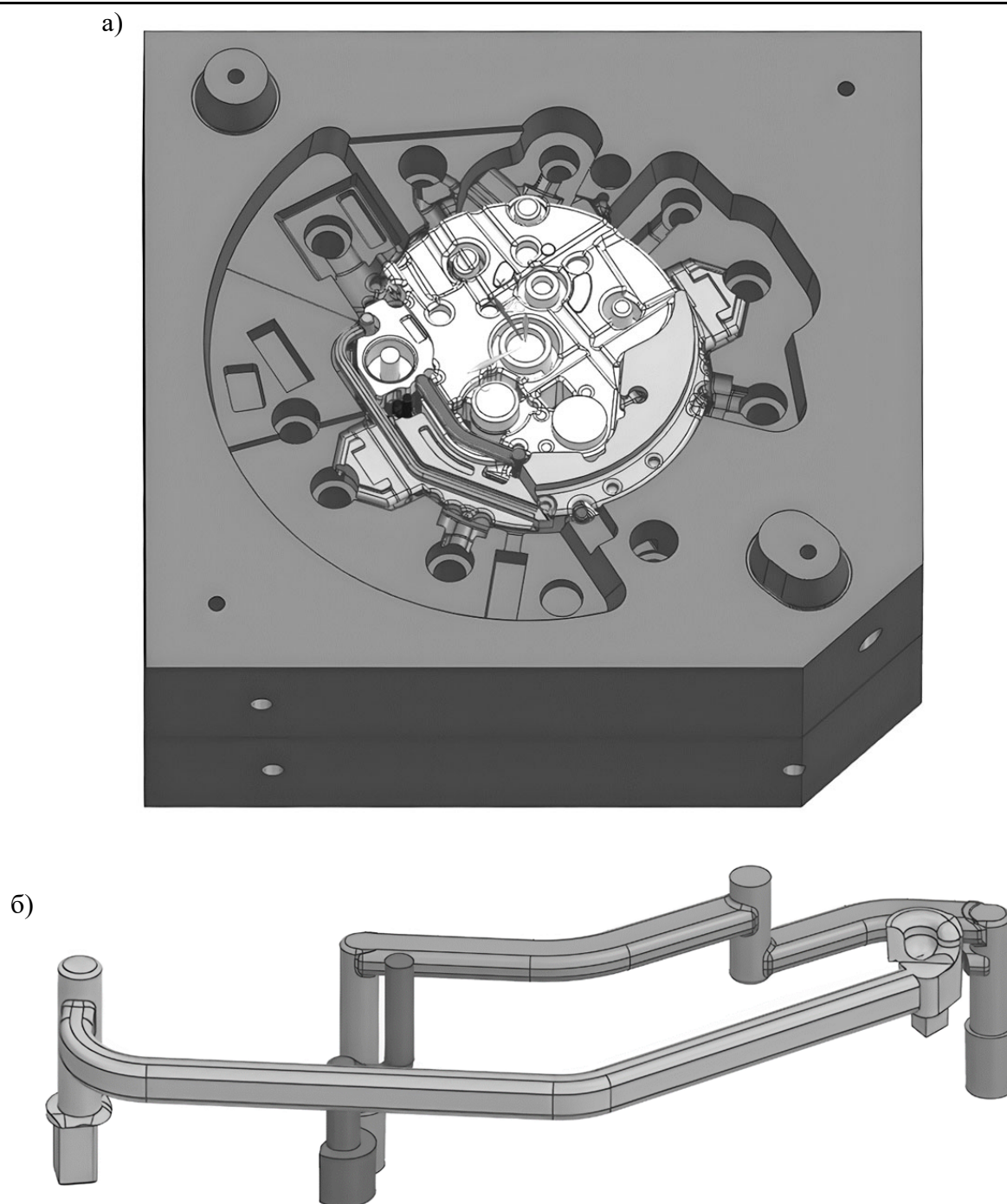


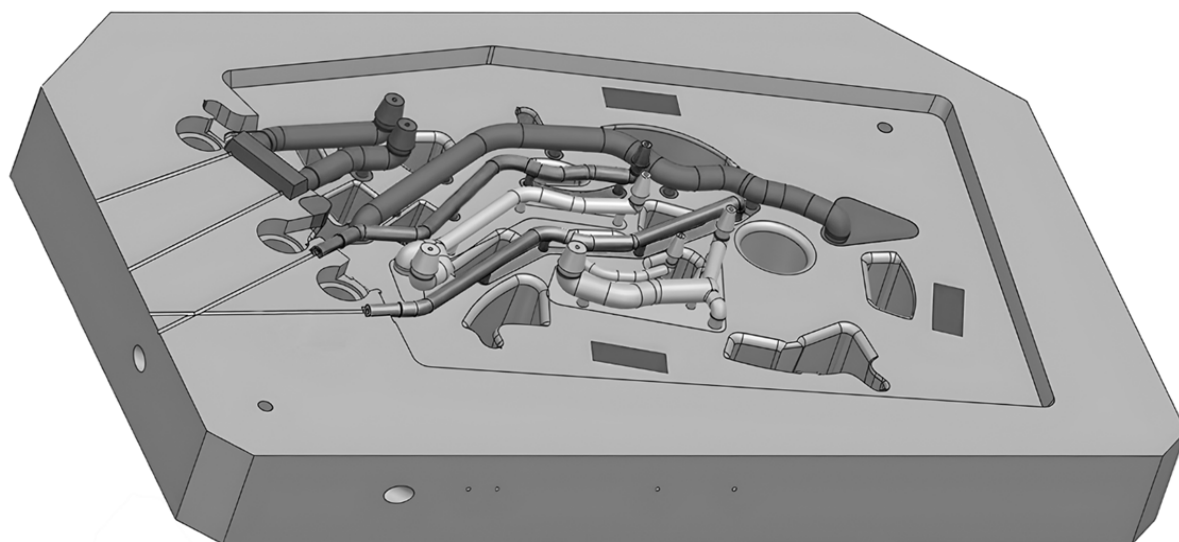
Рис. 3. Часть литейной формы для отливки «Корпус»: а – места расположения проблемных стержней в форме ЛПД; б – конфигурация стержней

Во всех экспериментах по получению отливок литьём под низким давлением (ЛПНД) с применением таких стержней из полости литейной формы удалялись газы, выделяющиеся во время заливки с применением установки для откачки воздуха.

Однако в готовых отливках на внутренней поверхности каналов, выполненных ВЛ-стержнями, был обнаружен ряд дефектов – несплошностей в теле отливки, фиксируемых как при визуальном контроле, так и при неразрушающих инструментальных методах контроля (см. рис. 5-9). Предположительно, высокая плотность 3D-печати вызывает вскипание и образование газовых ра-

ковин вследствие пониженной газопроницаемости длинномерного стержня тонкого сечения. Особо тщательно проверяли устройство и состояние вентиляции литейной формы в целом и каждого из стержней. Гипотеза о том, что для тонких сплошных стержней сопротивление проникновению газов, образующихся в результате выделения с поверхности стержней во время заливки, больше, чем у формирующейся корочки отливки, нашла своё подтверждение, и в опасных сечениях формировались дефекты.

а)



б)

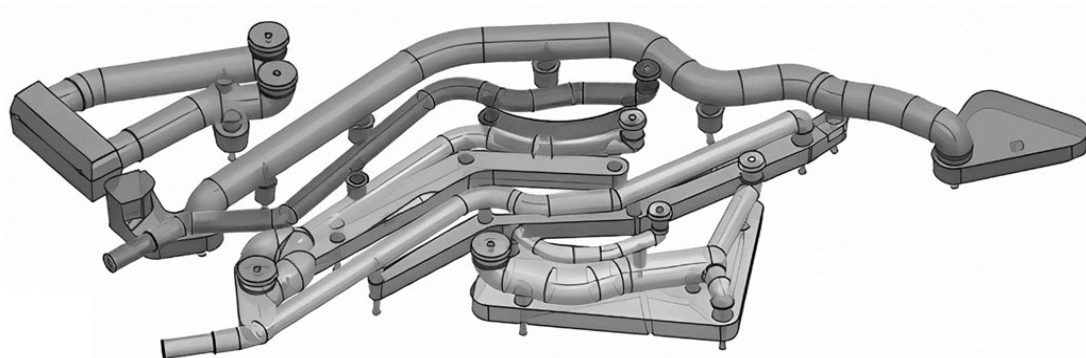


Рис. 4. Часть литейной формы для отливки «Адаптер»: а – нижняя часть пресс-формы ЛПД со стержнями; б – конфигурация стержней

По результатам анализа причин получения неудовлетворительных результатов экспериментального литья была изменена технология изготовления стержней диаметром менее 10 мм.

Замещающая технология получения полых длинномерных стержней сложной конфигурации диаметром 10 мм и меньше – метод послойного лазерного спекания (SLS) плакированного песка на 3D-принтере с последующей прочисткой от не спечённых послойно объёмов и тепловой обработкой для набора максимальной прочности.

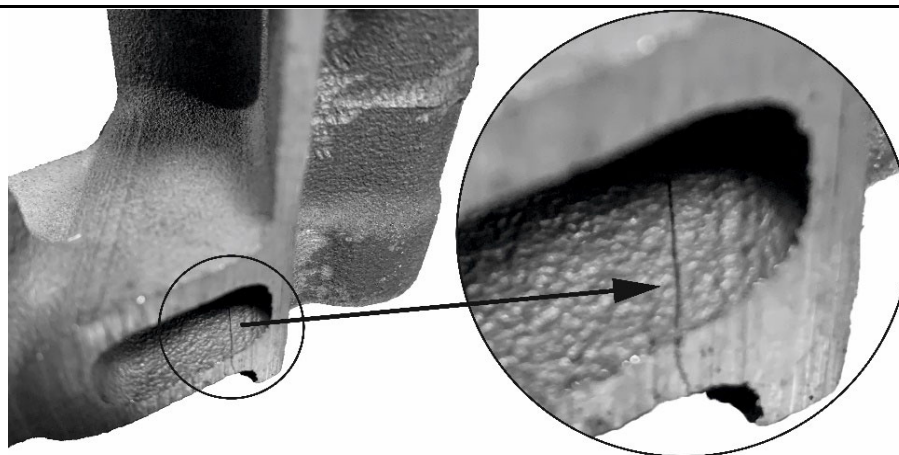


Рис. 5. Дефект в отливке, выявленный методом визуального контроля

Неотверждённый плакированный песок в ресурсосберегающем технологическом процессе изготовления пустотелых SLS-стержней собирается и используется в последующих циклах печати без дополнительной подготовки. Технологический процесс получения стержней с применением 3D-принтера с лазерным оплавлением смолы между песчинками огнеупорной основы на заданных участках слоя отличается более коротким циклом изготовления стержней, следовательно, и большей производительностью.

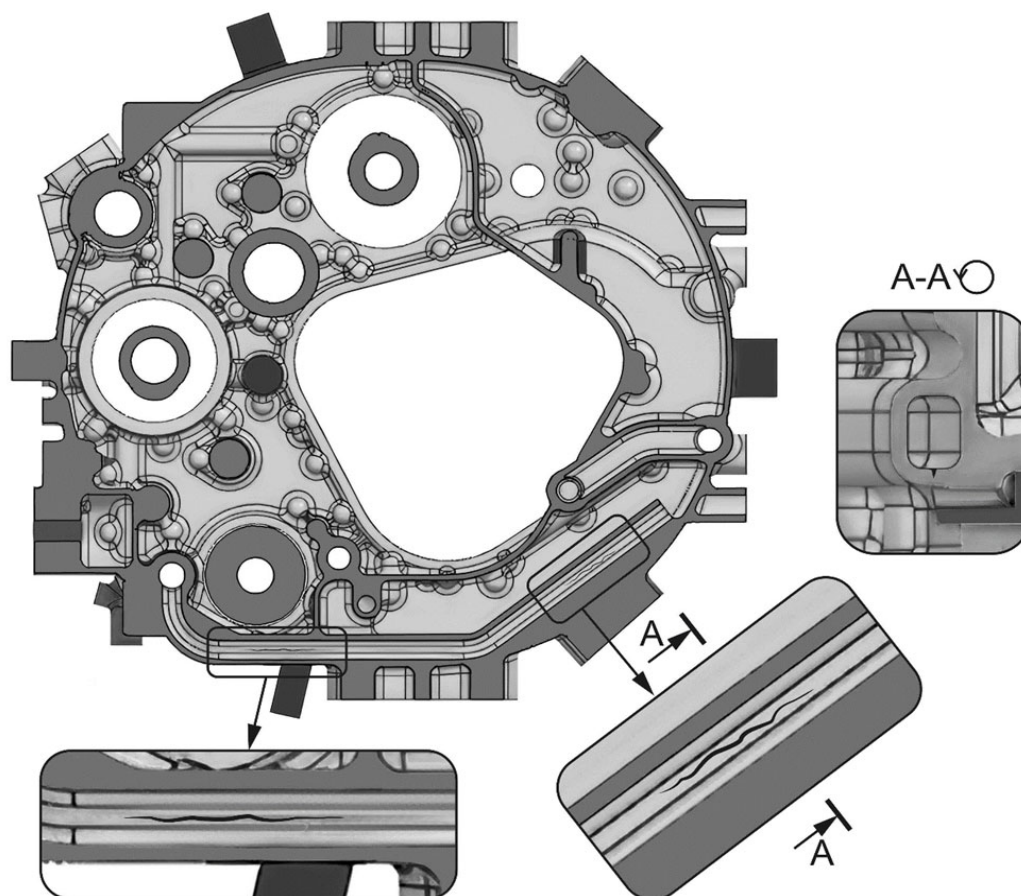


Рис. 6. Схема зон образования дефектов в зонах ответственных сечений отливок

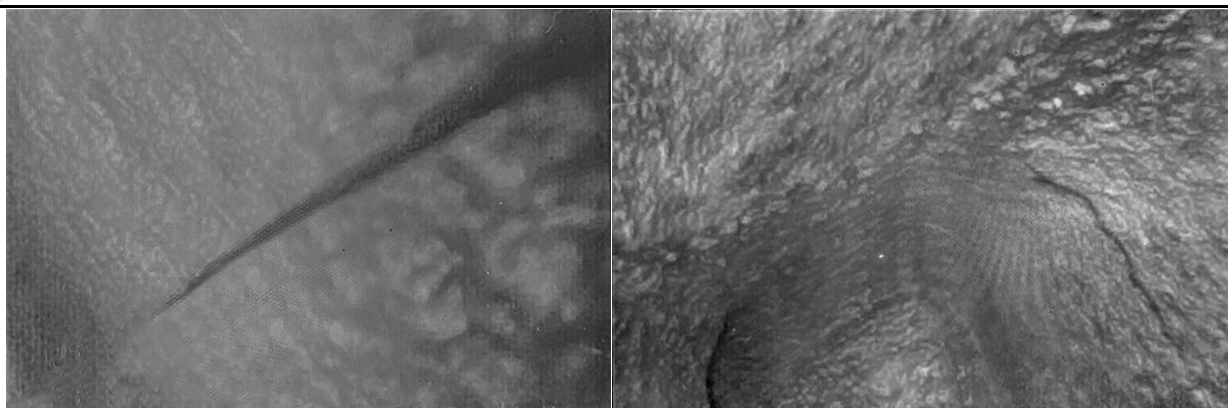


Рис. 7. Дефекты на внутренней поверхности каналов, выявленные эндоскопическим контролем (видеоэндоскоп LASERTECH VE 630)

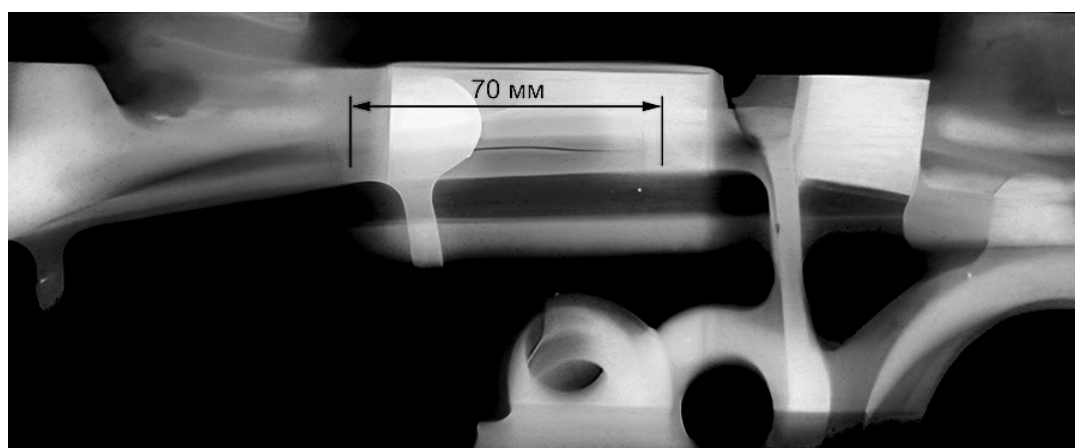


Рис. 8. Дефект, выявленный рентгеноскопическим 2D-контролем (Экстравольт-320)

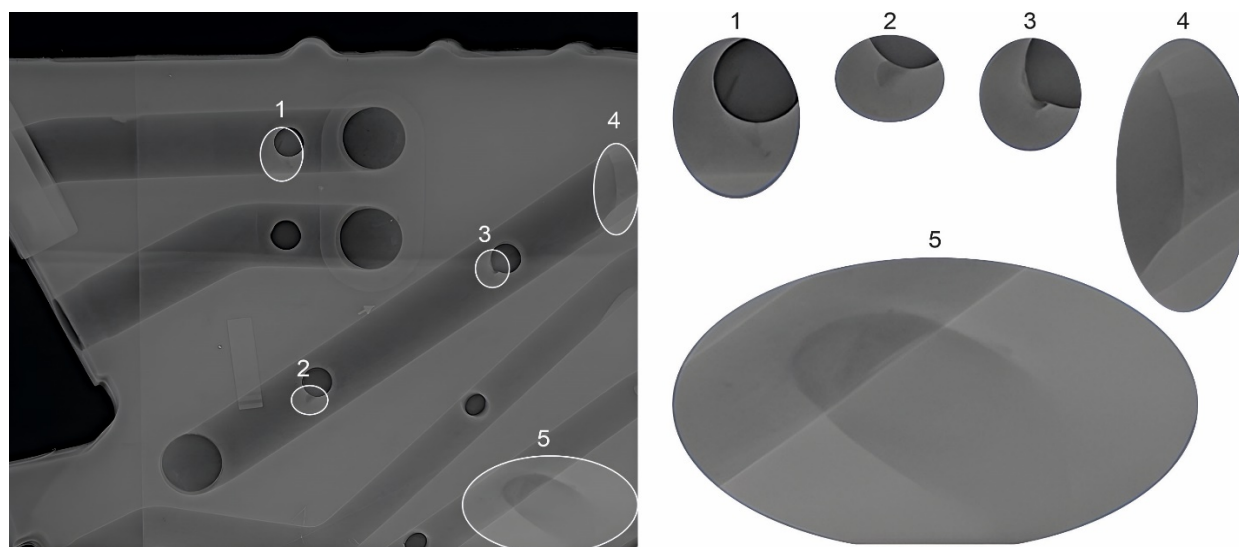


Рис. 9. Дефекты, выявленные при 3D-контроле с помощью РКТ (СТ-850XCSF)

В отливках, выполненных со сплошными SLS-стержнями, были также обнаружены дефекты. Для эффективного удаления газов, образующихся в процессе заливки формы металлом, принято решение применять полую конструкцию оригинальных стержней, что снижает вероятность образования газовых раковин, пор и других дефектов в готовой отливке за счёт увеличения пропускной способности системы отвода газов в литейной форме. Пропускная способность полых стержней получается выше из-за уменьшения пути фильтрации газов через стенку оболочкового стержня при неизменном диаметре.

Аддитивная технология SLS позволяет получить пустотелые длинномерные стержни наименьшего диаметра, возможного к применению для формообразования протяжённых полостей и каналов переменной конфигурации, например, стержень наружным диаметром 6 мм с внутренним каналом диаметром 2 мм и толщиной стенки 2 мм (см. рис. 10).

При этом прочностные характеристики стержней сохраняются. С увеличением диаметра сечения стержней на каждые 2 мм увеличивали диаметр отверстия вентиляционного канала на 0,5 мм.

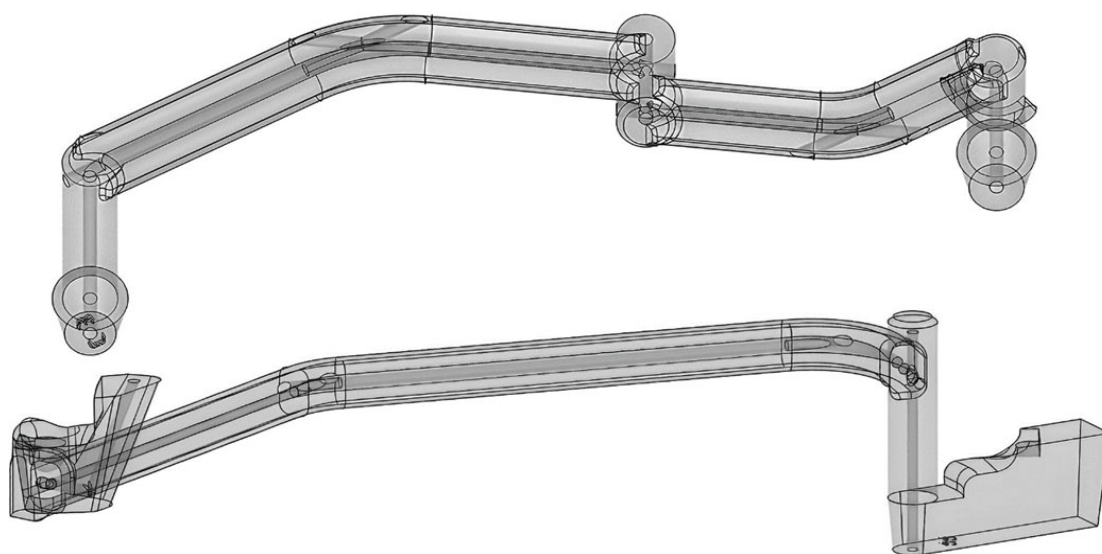


Рис. 10. Полые SLS-стержни

Также в пресс-форме ЛПД были предусмотрены дополнительные вентиляционные каналы, что в совокупности с каналами внутри стержней создаёт разветвлённую вентиляционную систему для наиболее эффективного газоотвода в процессе заливки (см. рис. 11).

Применение данного подхода на практике выявило существенное уменьшение количества дефектов в отливках, вплоть до практически полного их устранения в зонах ответственных сечений (см. рис. 12). Измеренные максимальные значения отклонений геометрических размеров стержней, изготовленных с применением технологии SLS, равны 0,16 мм.

Внедрение вентиляционных каналов в полых стержнях снижает их массу, улучшает процесс удаления стержней из отливок.

Разработанный технологический цикл объединяет различные технологии и процессы, такие как проектирование модели литейной формы CAD и каждого её элемента, создание 3D-модели песчаных стержней и преобразование модели в формат STL (затем модель разбивается на слои для перевода информации на язык, понятный 3D-принтеру, а данные передаются на печать), 3D-печать стержней и изготовление частей пресс-формы, выплавка и подготовка расплава, сборка литейной формы и заливка расплавом, затвердевание и охлаждение отливки, извлечение отливки из пресс-формы, отрезка элементов ЛПС, удаление стержней и комплекс приёмочных испытаний.

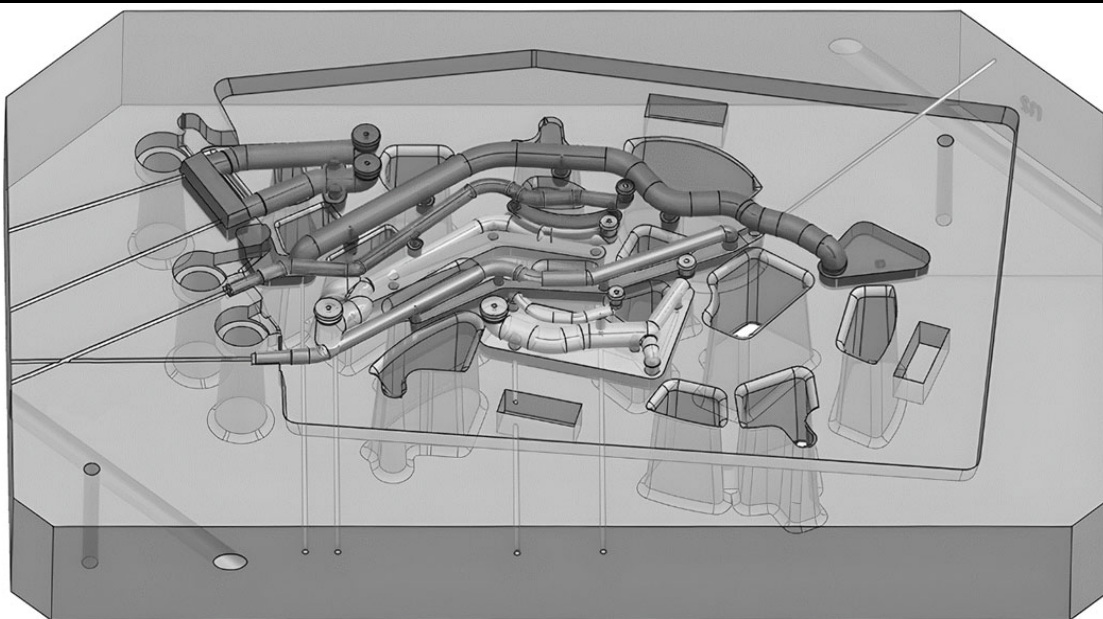


Рис. 11. Пресс-форма с системой вентиляционных каналов

Дефекты, возникавшие по причине газотворности смеси и низкой проницаемости после применения полых стержней, в опытных заготовках не обнаружены. В применении аддитивных технологий изготовления стержней BJ и SLS реализованы их значительные преимущества перед традиционными методами, такие как высокая точность ($\pm 0,1$ мм для SLS и $\pm 0,2$ мм для BJ), возможность создания сложных геометрий и снижение времени производства.

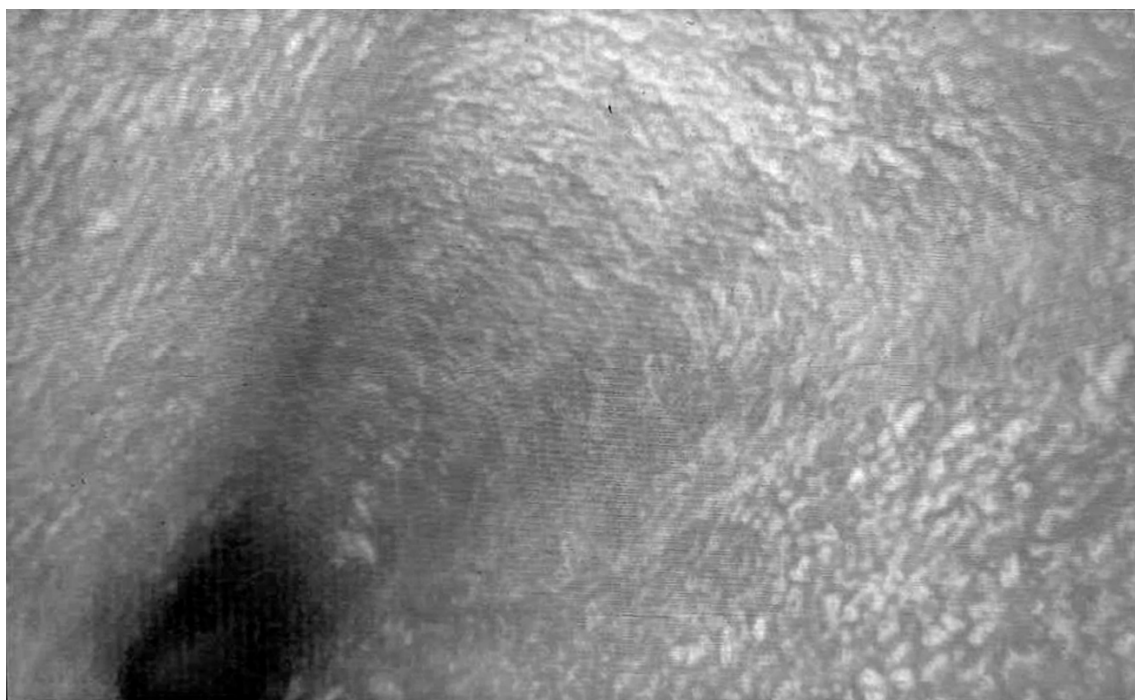


Рис. 12. Отсутствие дефектов на внутренней поверхности канала в зоне ответственного сечения отливки (видеоэндоскоп LASERTECH VE 630)

Выводы. Литейные стержни сложной конфигурации, полученные с использованием аддитивных методов, апробированы для получения деталей авиационной промышленности из алюминиевых сплавов способом литья под низким давлением. В результате проведенного исследования установлено, что внедрение полых стержней в систему вентиляционных каналов пресс-формы ЛПД позволило снизить количество газовых дефектов в экспериментальных отливках на 70...100 % (вплоть до их полного устранения) по сравнению с использованием сплошных ВJ-стержней и SLS-стержней. Полученные результаты подтверждают высокую гибкость и эффективность применения аддитивных технологий, выражающуюся в снижении общего брака отливок на 50...60 %, сокращении производственного цикла, уменьшении количества оснастки и объема отходов материалов.

Стержни, изготовленные методом SLS, обладают повышенной прочностью (2,8...2,9 МПа) и термостойкостью (до 300...350 °С) при минимальных диаметрах (до 6 мм) и толщине стенки (до 2 мм), что делает их пригодными для использования в отливках авиационных деталей сложной конфигурации с протяженными и тонкими каналами сложной пространственной геометрии. Значения отклонения 3D-печати стержней по технологии SLS составляет 0,16 мм и находится в пределах допуска для технологии ХТС ЛТ6: 1,5...1,7 мм ОСТ 1.41154-86 и ГОСТ Р 53464-2009.

Технологии послойного синтеза – динамично развивающееся направление «цифрового» производства, а создание единого банка данных позволит исследователям реализовать улучшение действующих современных технологических процессов при переходе к выпуску новых изделий авиационного и в других наукоемких отраслях.

Перспективы внедрения цифровых технологий не ограничиваются только 3D-принтерами. Внедрение в технологию 3D-сканера (координатно-измерительной машины) позволяет ускорить выполнение прототипирования, а также осуществлять контроль литых заготовок и деталей с меньшей долей погрешности измерений и большей степенью автоматизации. РТК позволяет выявлять по всему объему дефекты, недоступные для других методов контроля, определять отклонения геометрии и автономно анализировать результаты, сравнивая координатные измерения с воксельными данными САПР (STEP, IGES), сетками STL. Современные аддитивные технологии и аппаратура для их реализации на ООО «ВР Литейное производство» помогают предприятию изготавливать конкурентоспособную технически сложнопроизводимую продукцию с меньшим количеством оснастки и большей добавленной стоимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошниченко, В. С. Цифровые и аддитивные технологии в литейном производстве / В. С. Мирошниченко, Ю. И. Гутько, А. Н. Голофаев // Литейное производство. – 2023. – № 6. – С. 38-39.
2. Дорошенко, В. С. Три направления цифровизации литейного производства: виртуальный инжиниринг, цифровой двойник, аддитивные технологии / В. С. Дорошенко // Металлургия машиностроения. – 2022. – № 1. – С. 37-40.
3. Булышко, Т. А. Интеграция аддитивных технологий в литейное производство / Т. А. Булышко // Гагаринские чтения – 2022: сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVIII. – Москва: Изд-во «Перо», 2022. – С. 473-474.
4. Любомиров, Д. А. Совершенствование производства стального литья ответственного назначения с применением аддитивных технологий / Д. А. Любомиров, И. О. Леушин, А. В. Герасимов // Литейщик России. – 2024. – № 7. – С. 23-24.
5. Применение аддитивных технологий при изготовлении водоохлаждаемых пресс-форм для получения выплавляемых моделей / Р. Р. Ганиев, Е. С. Гайнцева, А. О. Деменок, И. И. Ахметханов, Л. Ф. Ганиева // Литейщик России. – 2024. – № 6. – С. 6-11.
6. Юдин, В. А. О вопросе импортозамещения материалов для 3D-печати литейных песчано-полимерных форм / В. А. Юдин // Литейщик России. – 2019. – № 4. – С. 15-19.
7. Исследование новых наполнительных материалов для 3D-печати литейных форм по Inkjet технологии / А. А. Рижский, В. Е. Баженов, М. Б. Абдулазизов, А. С. Анищенко // Литейное производство. – 2024. – № 3. – С. 17-19.
8. Дорошенко, В. С. Об оптимизации литых металлоконструкций с помощью цифровых двойников и 3D-печати / В. С. Дорошенко // Металлургия машиностроения. – 2021. – № 6. – С. 30-36.



9. Анализ параметров SLS- и SLM-технологии для литейного производства / Д. М. Юдин, А. В. Жданова, С. И. Костин, О. Н. Торпищева // *Литейное производство*. – 2024. – № 7. – С. 36-38.
10. Яковлева, А. П. Применение методов послойного спекания для изготовления деталей машин авиационной промышленности / А. П. Яковлева, А. Б. Истомин, М. Д. Щеголева // *Главный механик*. – 2024. – Т. 21. – № 7 (251). – С. 34-43.
11. Лопатин, А. Н. Изготовление формообразующей оснастки аддитивными методами для композитных деталей / А. Н. Лопатин, И. Д. Зверков // *Авиационные материалы и технологии*. – 2019. – № 2 (55). – С. 53-59.
12. Никитин, К. В. Итоги Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении 2023» / К. В. Никитин, К. А. Батышев // *Цветные металлы*. – 2023. – № 12. – С. 85-86.
13. Верцюх, С. С. Пути увеличения стойкости литейной технологической оснастки, изготовленной с применением аддитивных технологий / С. С. Верцюх, С. Л. Захаров // *Литейное производство*. – 2024. – № 8. – С. 28-31.
14. Абрамов, А. А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Часть I. Классификация и особенности высокопрочных литейных алюминиевых сплавов / А. А. Абрамов // *Литейное производство*. – 2021. – № 2. – С. 13-19.
15. Харчев, Р. М. Технологическая проба для оценки заполняемости тонкостенных корпусных отливок из алюминиевых сплавов / Р. М. Харчев, А. Н. Грачев // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2021. – Т. 19. – № 9. – С. 387-391.
16. Потатурина, Е. Противопригарные покрытия для форм и стержней, изготовленных по аддитивным технологиям / Е. Потатурина, К. Сигер // *Литейное производство*. – 2021. – № 11. – С. 30-33.
17. Смирнов, В. В. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство / В. В. Смирнов, Е. Ф. Шайхутдинова // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. – 2013. – № 2-2. – С. 90-94.
18. Об использовании в литейном производстве аддитивных и гибридных технологий / А. Ю. Коротченко, Д. Э. Хилков, М. В. Тверской, А. А. Хилкова // *Литейное производство*. – 2019. – № 6. – С. 26-28.
19. Плешаков, Ф. А. Прочность литейной формы при применении аддитивных технологий / Ф. А. Плешаков, Н. Т. Морозова // *Мировые научные исследования и разработки: современные достижения, риски, перспективы: материалы XIV Международной научно-практической конференции*. – Ставрополь: Параграф, 2023. – С. 228-230.

Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Щекин А. В., Борец М. И., Ермаков М. А.
КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ
СТЕРЖНЕЙ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КАЧЕСТВО ОТЛИВОК

Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Щекин А. В., Борец М. И., Ермаков М. А.
S. V. Dorofeev, A. R. Voynov, A. V. Shchekin, M. I. Borets, M. A. Ermakov

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ
СТЕРЖНЕЙ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ И КАЧЕСТВО ОТЛИВОК**

**COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE IMPACT OF FOUNDRY CORE MANUFACTURING
TECHNOLOGY ON THEIR PHYSICAL, MECHANICAL AND OPERATIONAL
CHARACTERISTICS AND QUALITY OF CASTINGS**

Дорофеев Станислав Вячеславович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 005541@togudv.ru.

Stanislav V. Dorofeev – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 005541@togudv.ru.

Войнов Александр Робертович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 006326@togudv.ru.

Alexander R. Voinov – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 006326@togudv.ru.

Щекин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 000396@togudv.ru.

Andrei V. Shchekin – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 000396@togudv.ru.

Борец Максим Александрович – магистрант Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 2019104946@togudv.ru.

Maksim I. Borets – Master's Degree Student of the Higher School of Industrial Engineering of the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 2019104946@togudv.ru.

Ермаков Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 007500@togudv.ru.

Mihail A. Ermakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 007500@togudv.ru.

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ влияния технологий изготовления литейных стержней: холоднотвердеющих смесей (ХТС), Binder Jetting (BJ) и селективного лазерного спекания (SLS) – на их физико-механические и эксплуатационные характеристики, а также качество отливок из алюминиевых сплавов. Исследованы плотность, пористость, прочность, газопроницаемость, газотворность, осыпаемость и термостойкость стержней, установлена корреляция этих параметров с дефектностью отливок (песчаными включениями, газовыми порами, неровностями поверхности). Показано, что SLS обеспечивает минимальную дефектность (брак 5...15 %, < 5 % с полыми стержнями) благодаря высокой плотности (2,1...2,4 г/см³), низкой газотворности (3...8 см³/г) и осыпаемости (0,1...0,3 %), но требует улучшения газоотвода. ХТС оптимальна для массивных отливок (> 50 кг) за счёт высокой газопроницаемости (23...27 ед.), несмотря на



повышенную газотворность ($10 \dots 15 \text{ см}^3/\text{г}$) и осыпаемость ($0,7 \dots 1,2 \%$). ВJ подходит для отливок средней массы ($10 \dots 50 \text{ кг}$), но анизотропия свойств (осыпаемость до $1,2 \%$ в Z-направлении) ограничивает её применение. Разработаны рекомендации по выбору технологии в зависимости от массы, конструкции и требований к отливкам, подтверждённые снижением брака на $70 \dots 100 \%$.

Summary. The article presents a comprehensive analysis of the influence of core manufacturing technologies – cold-hardening mixtures (CHM), Binder Jetting (BJ), and Selective Laser Sintering (SLS) – on their physical, mechanical and operational characteristics, as well as the quality of aluminum alloy castings. The study examines density, porosity, strength, gas permeability, gas generation, collapsibility, and thermal stability of cores, establishing correlations between these parameters and casting defects (sand inclusions, gas pores, surface irregularities). It is demonstrated that SLS ensures minimal defect rates ($5 - 15 \%$ rejection, $<5 \%$ with hollow cores) due to high density ($2,1 - 2,4 \text{ g/cm}^3$), low gas generation ($3 - 8 \text{ cm}^3/\text{g}$), and collapsibility ($0,1 - 0,3\%$), though it requires enhanced gas venting. CHM is optimal for massive castings ($>50 \text{ kg}$) owing to high gas permeability ($23-27$ units), despite increased gas generation ($10 - 15 \text{ cm}^3/\text{g}$) and collapsibility ($0,7 - 1,2 \%$). BJ is suitable for medium-mass castings ($10 - 50 \text{ kg}$), but anisotropy of properties (collapsibility up to 1.2% in the Z-direction) limits its application. Recommendations for selecting the appropriate technology based on casting mass, design, and requirements are developed, supported by a $70 - 100 \%$ reduction in defects.

Ключевые слова: литейное производство, литейные стержни, физико-механические свойства, эксплуатационные характеристики, пористость, газопроницаемость, газотворность, осыпаемость, термостойкость, качество отливок, песчаные включения, газовые поры, алюминиевые сплавы, аддитивные технологии.

Key words: foundry production, casting cores, physical and mechanical properties, operational characteristics, porosity, gas permeability, gas generation, collapsibility, thermal stability, casting quality, sand inclusions, gas pores, aluminum alloys, additive manufacturing.

УДК 621.74

Введение. Современное литейное производство сталкивается с возрастающими требованиями к качеству отливок при необходимости одновременного повышения производительности и снижения затрат. Одним из определяющих факторов, влияющих на достижение этих целей, является технология изготовления литейных стержней, которые формируют внутренние полости отливок и во многом определяют качество получаемого литья [1–5].

Среди наилучших формовочных смесей хорошо зарекомендовали себя плакированные песчано-смоляные смеси, в которых смола и добавки в виде тонкой плёнки покрывают зёрна песка, при этом для придания прочности смесям требуется нагрев, что ограничивает выбор материалов модельных комплектов и чрезвычайно усложняет их изготовление. Песчано-смоляные смеси, твердение которых осуществляется только за счёт введения катализатора, получили название холоднотвердеющих (ХТС) и набирают прочность в оснастке. Для применения ХТС с синтетическими смолами основными проблемами можно считать снижение содержания связующего в смесях, повышение их термостойкости, снижение объёма газовыделения на стадиях формовки и охлаждения залитых форм, изыскание композиций, обладающих минимальной токсичностью [6–12]. При разработке технологии изготовления ХТС стержней необходимо иметь данные о содержании примесей в песке, типе смолы и катализатора, температуре окружающей среды, последовательности загрузки компонентов, продолжительности перемешивания и о других производственных факторах. Поэтому с развитием аддитивных технологий струйной и лазерной печати по трёхмерным виртуальным моделям открылись новые возможности для получения литейных стержней сложной геометрии с повышенной точностью [13–17].

Ключевыми параметрами, определяющими применение стержней, являются их физико-механические свойства: плотность (ρ), пористость (Π), размер пор, прочность ($\sigma_{сж}$, σ_r , $\sigma_{и}$, $\sigma_{сдвиг}$) и точность изготовления. Эксплуатационные характеристики стержней, такие как термическая стойкость, газопроницаемость (Γ), газотворность и осыпаемость (O), также влияют на количество дефектов в отливках. Стержни, произведённые методом селективного лазерного спекания (SLS), ха-

характеризуются более низкими значениями пористости $5...12\%$ и $\rho = 2,1...2,4 \text{ г/см}^3$, что обеспечивает прочность при испытаниях на растяжение $\sigma_p = 3,0...4,5 \text{ МПа}$, снижает газопроницаемость, повышая количество газовых дефектов литья. Технология струйной печати Binder Jetting (BJ) имеет промежуточные характеристики: $\Pi = 20...30\%$, с приемлемой прочностью, но пониженные значения прочностных свойств, измеренные по нормали к поверхности рабочего стола 3D-принтера, осыпаемость до $1,2\%$, что требует принятия дополнительных мер при проектировании.

Таким образом, выбор технологии изготовления стержней представляет собой задачу оптимизации, требующую учёта не только массы и конструкции отливок, но и физико-механических и эксплуатационных свойств элементов литейной оснастки в зависимости от назначения.

Целью проведённого исследования является комплексный анализ влияния технологии изготовления виброуплотняемых литейных стержней из фурановых ХТС, а также из фурановых смесей для 3D-печати и из плакированных смесей для 3D-печати на их свойства. Для анализа влияния фурановой технологии ХТС и методов аддитивного производства BJ и SLS на характеристики стержней были поставлены следующие задачи:

1. Определить физико-механические свойства стержней, включая плотность, пористость, размер пор, прочность на сжатие, растяжение, изгиб и сдвиг, а также точность их исполнения.
2. Оценить эксплуатационные характеристики стержней: термическую стойкость (остаточную прочность после нагрева до $600\text{ }^\circ\text{C}$ для ХТС и BJ, до $700\text{ }^\circ\text{C}$ для SLS), газопроницаемость, газотворность и осыпаемость.
3. Исследовать корреляцию между структурными параметрами (пористостью, размером пор) и эксплуатационными свойствами (осыпаемостью, газопроницаемостью), установить их влияние на качество отливок и разработать практические рекомендации по выбору технологии изготовления стержней.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к сравнительному анализу технологий ХТС, BJ и SLS, отличающихся возможностью автоматизации труда, для установления взаимосвязи между физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Проведённый анализ корреляции между пористостью, размером пор и осыпаемостью стержней, а также их влияния на образование дефектов отливок дополняет существующие исследования в области литейных технологий [14; 15].

Материалы и методы. Выбор технологий изготовления стержней для проведения сравнительного анализа обусловлен их представленностью в литейном производстве: ХТС применяют с виброуплотнением смеси в стержневом ящике, BJ и SLS – современные аддитивные технологии получения стержней по цифровой модели без стержневого ящика.

В технологии ХТС с фурановыми смолами применяли песок кварцевый с фракцией $0,2...0,4 \text{ мм}$, смолу $1,0...1,5\%$ (от массы песка) и отвердитель $0,3...0,5\%$ (от массы смеси). Процесс изготовления включает смешивание компонентов в Mixer T36-30S, формовку экспериментальных стержней в стержневых ящиках и отверждение при температуре $20...25\text{ }^\circ\text{C}$ в течение $30...60 \text{ мин}$.

Технология BJ основана на послойном распылении фуранового связующего тонкими струями из неподвижной многосопловой головки FHZL PCM1200 AJ на кварцевый песок с толщиной слоя $0,28 \text{ мм}$. Смесь содержала $1,2...1,8\%$ фурановой смолы, нанесение связующего осуществлялось с разрешением $0,1 \text{ мм}$, после изготовления стержни подвергались отверждению при $25\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 24 ч . Постобработка включала удаление несвязанного песка и сушку при $50\text{ }^\circ\text{C}$. Отмечено различие измеренных значений свойств по осям ортогональной системы координат до 20% .

Технология SLS использует лазерное спекание плакированного кварцевого песка (фракция $0,1...0,15 \text{ мм}$), с учётом высокой температуры плавления SiO_2 предполагается плавление связующего на поверхности песчинок основы. Сыпучие смеси холодного, тёплого и горячего плакирования в состоянии поставки характеризуются начальным отсутствием связи между зёрнами. Упрочнение сыпучей плакированной смеси осуществляли с помощью тепловой обработки в два этапа: первый этап – лазером на столе 3D-принтера AFS-500 (Beijing Longyuan Automatic Molding System Co., Ltd, Китай); второй – обработка в течение $3...4 \text{ мин}$ в печи с температурой рабочего про-



странства 350...450 °С, что даёт дополнительный импульс отверждения и значительно повышает эффективность использования энергоносителей. После спекания стержни охлаждались в течение 12 ч.

Свойства экспериментальных стержней, а также точность размеров измеряли по стандартным методикам. Качество отливок, полученных в лабораторных условиях с применением стержней ХТС, ВJ и SLS, оценивалось по наличию дефектов: песчаных включений и газовых пор. Каждый метод применялся к трём сериям образцов (по 10 стержней на технологию), что обеспечивает статистическую достоверность полученных результатов. Для опытов использовался сплав АК7ч по ГОСТ 1583-93, выплавленный в выемном стальном окрашенном тигле печи сопротивления с перегревом 70...100 °С над температурой ликвидус.

Результаты и их обсуждение. Далее представлены результаты экспериментального исследования литейных стержней, изготовленных по технологиям ХТС, ВJ и SLS, с акцентом на их физико-механические и эксплуатационные свойства, а также влияние этих характеристик на качество отливок. Исследование структурировано по трём основным направлениям: анализ физико-механических свойств стержней, оценка эксплуатационных характеристик и изучение их комплексного влияния на дефекты литья приведены в табл. 1-3 и сопровождаются корреляционным анализом.

Таблица 1

Физико-механические свойства литейных стержней

Параметр		ХТС	ВJ	SLS
Плотность, г/см ³		1,6...1,8	1,7...2,0 (X/Y), 1,5...1,8 (Z)	2,1...2,4
Пористость, %		35...40	30...35 (X/Y), 35...40 (Z)	5...12
Размер пор, мкм		50...200	30...100	10...50
Зернистость песка, мм		0,2...0,4	0,1...0,2	0,1...0,15
Точность (макс. отклонение), мм		±0,3	±0,2	±0,1
Прочность на сжатие, МПа	2 ч	5...10	3...6 (X/Y), 2...5 (Z)	3...7
	4 ч	8...15	4...8 (X/Y), 3...6 (Z)	
	24 ч	10...20	5...10 (X/Y), 4...8 (Z)	
Прочность на изгиб, МПа	2 ч	1,5...2,0	1,76 (X/Y), 1,55 (Z)	2,8...2,9
	4 ч	2,0...2,5	1,74 (X/Y), 1,40 (Z)	
	24 ч	2,5...3,0	1,87 (X/Y), 1,48 (Z)	
Прочность на растяжение, МПа		1,0...2,0	2,0...3,5 (X/Y), 1,5...2,0 (Z)	3,0...4,5
Прочность на сдвиг, МПа		1,0...1,8	1,8...2,5 (X/Y), 1,0...1,5 (Z)	3,0...4,0

Анализ данных табл. 1, показал, что структурные характеристики стержней существенно различаются в зависимости от технологии: SLS-стержни имеют максимальную плотность, минимальную пористость и наивысшую точность из-за мелкозернистой огнеупорной основы компактной структуры; ХТС имеет самую рыхлую структуру и наибольшее отклонение размеров.

Значения $\rho = 2,1 \dots 2,4 \text{ г/см}^3$ для SLS-стержней обусловлены спеканием полимерной смолы, покрывающей зёрна песка, которая под воздействием лазера расплавляется, обеспечивает высокую когезию, заполняет межзёрненные пространства и придаёт материалу изотропию свойств. SLS-стержни получают с размером пор $10 \dots 30 \text{ мкм}$, обеспечивается точность $\pm 0,1 \text{ мм}$, а при использовании фракций огнеупорной основы $0,1 \dots 0,15 \text{ мм}$ значения пористости минимальны – $5 \dots 12 \%$ (см. рис. 1).

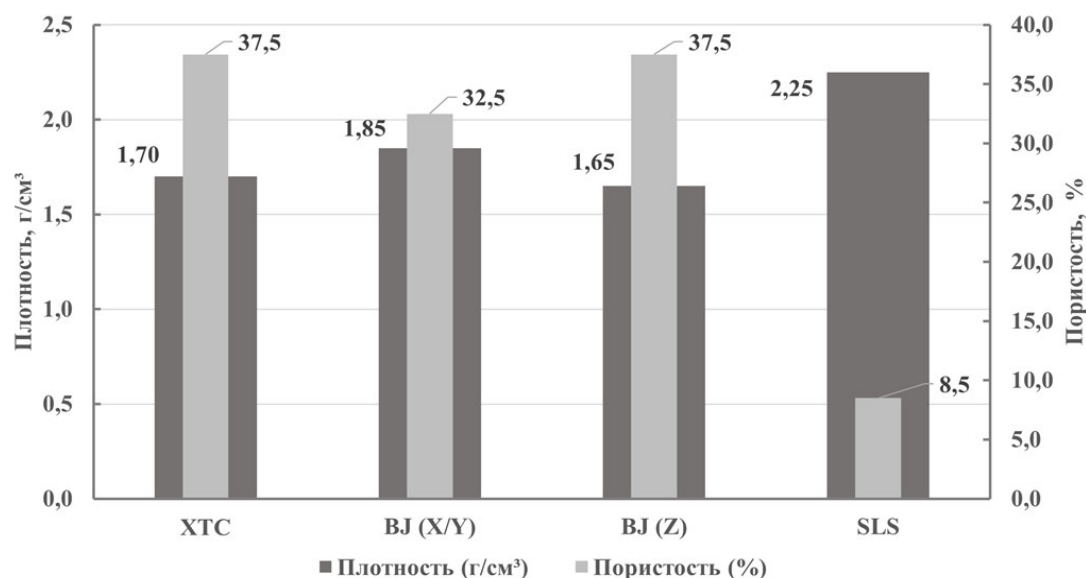


Рис. 1. Диаграмма плотности и пористости стержней

XTC-стержни имеют значения $\rho = 1,6 \dots 1,8 \text{ г/см}^3$ и $\Pi = 35 \dots 40 \%$ (см. рис. 1) из-за рыхлого расположения более крупных песчинок (фракции $0,2 \dots 0,4 \text{ мм}$), это обеспечивает размер пор $50 \dots 100 \text{ мкм}$, снижая точность изготовления до $\pm 0,3 \text{ мм}$.

Технология BJ занимает промежуточное положение: в направлениях X/Y (в плоскости слоёв) плотность составляет $1,7 \dots 2,0 \text{ г/см}^3$, а $\Pi = 30 \dots 35 \%$ (см. рис. 1), тогда как в направлении Z (перпендикулярно слоям) плотность снижается до $1,5 \dots 1,8 \text{ г/см}^3$, а $\Pi = 35 \dots 40 \%$. Это связано с низкой адгезией между слоями, обусловленной послойным нанесением связующего (1,5 % фурановой смолы), что приводит к образованию межслойных микропор ($30 \dots 100 \text{ мкм}$).

Изменение прочности на сжатие и изгиб, а также другие прочностные свойства показаны на рис. 2 и 3.

Для XTC-стержней значения прочности возрастают с $\sigma_{сж} = 5 \dots 10 \text{ МПа}$ (2 ч) до $\sigma_{сж} = 10 \dots 20 \text{ МПа}$ (24 ч); $\sigma_{и} = 1,5 \dots 2,0 \text{ МПа}$ (2 ч) до $\sigma_{и} = 2,5 \dots 3,0 \text{ МПа}$ (24 ч). Рост прочности обусловлен кинетикой отверждения фурановой смолы, усиливающей когезию между песчинками путём формирования полимерной сетки. Это делает стержни более устойчивыми к нагрузкам с течением времени.

Прочность BJ-стержней различна по направлениям. В направлениях X/Y прочность на сжатие увеличивается с $3 \dots 6 \text{ МПа}$ (2 ч) до $5 \dots 10 \text{ МПа}$ (24 ч), в Z – с $2 \dots 5 \text{ МПа}$ до $4 \dots 8 \text{ МПа}$; на изгиб в X/Y – с $1,76 \text{ МПа}$ (2 ч) до $1,87 \text{ МПа}$ (24 ч), в Z – с $1,55$ до $1,48 \text{ МПа}$. Незначительное изменение прочности связано с быстрым отверждением связующего, а анизотропия отражает различия в адгезии внутри и между слоями.

Для SLS-стержней значения $\sigma_{сж}$ подтверждают изотропию и структурную целостность материала.

Прочностные свойства стержней зависят от структуры материала, когезии и адгезии, а также от кинетики процессов отверждения или спекания связующих компонентов.

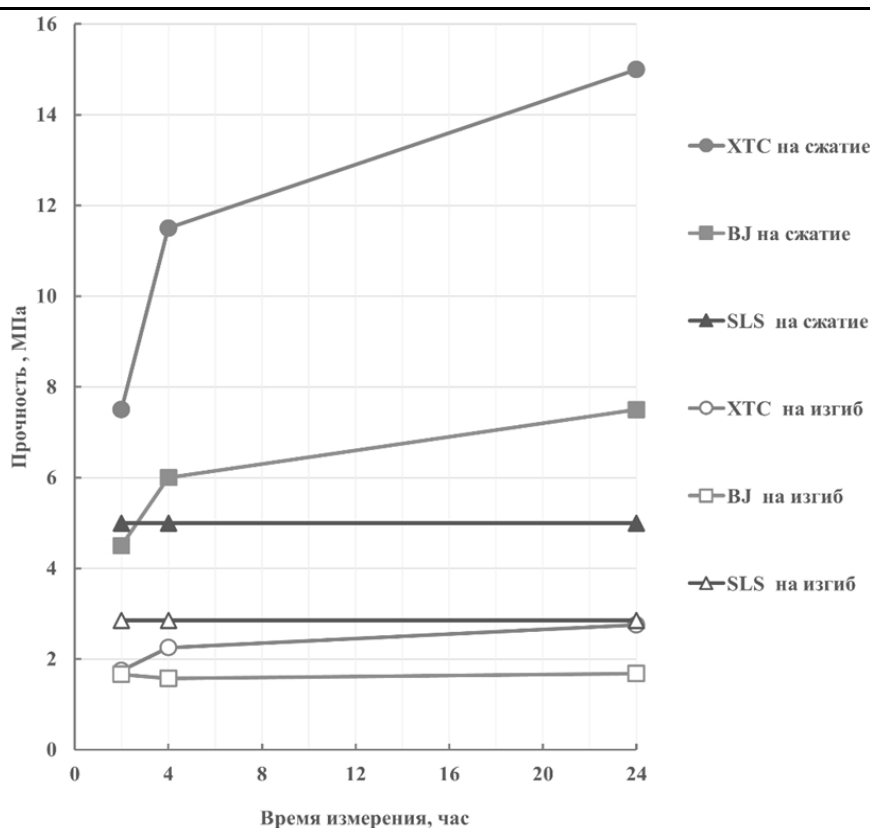


Рис. 2. График изменения прочности на сжатие и изгиб во времени

Сравнительная оценка прочностных характеристик через 24 ч после изготовления выявляет различия между данными образцов, изготовленных по технологиям XTC, BJ, SLS (см. рис. 3).

Стержни XTC обладают максимальной прочностью $\sigma_{сж} = 15$ МПа, однако их показатели $\sigma_p = 1,5$ МПа и $\sigma_{сдвиг} = 1,4$ МПа ограничены хрупкостью структуры из-за крупных пор, вызывающих хрупкое разрушение при нагрузках, что увеличивает риск образования трещин из-за термических и усадочных напряжений.

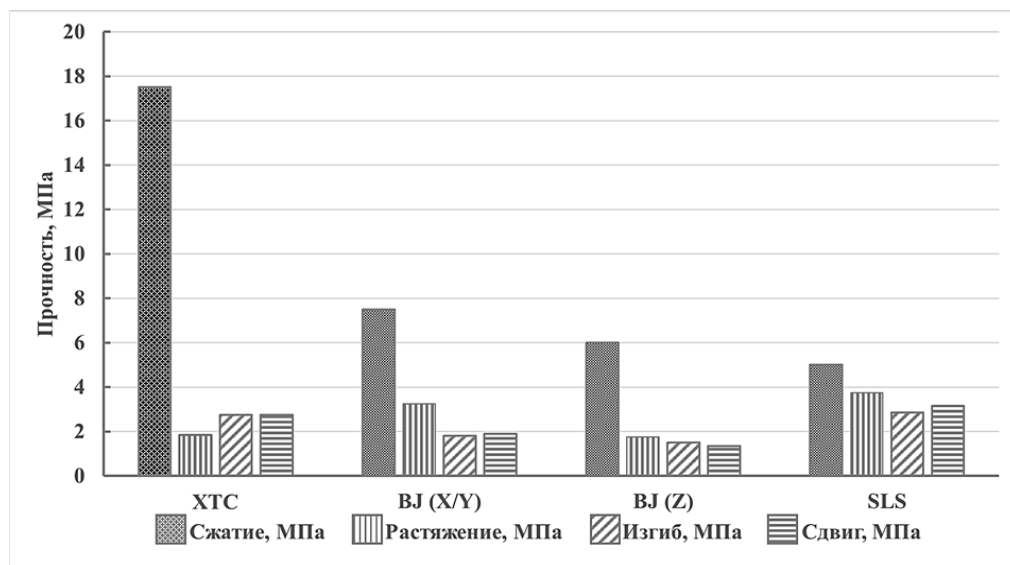


Рис. 3. Прочностные свойства стержней

Для ВJ-стержней характерна анизотропия: в плоскости X/Y значение $\sigma_{сж}$ достигает 7,5 МПа, $\sigma_p = 3,25$ МПа, $\sigma_{сдвиг} = 2,15$ МПа, тогда как в направлении Z значения снижаются до 6 МПа, 1,75 МПа и 1,25 МПа соответственно. Слабая адгезия между слоями увеличивает вероятность межслойного разрушения.

Стержни SLS имеют сбалансированные характеристики: $\sigma_{сж} = 5$ МПа, $\sigma_p = 3,75$ МПа, $\sigma_{и} = 2,85$ МПа, $\sigma_{сдвиг} = 3,5$ МПа, а сравнительная однородность материала обеспечивает устойчивость к различным нагрузкам и квазихрупкий тип разрушения.

В табл. 2 приведён результат анализа взаимосвязей между характеристиками стержней. Корреляционный анализ с использованием коэффициента корреляции Пирсона (r) в табл. 2 подтверждает связь между сжатием и растяжением образцов ($r = 0,78...0,92$), изгибом и сдвигом ($r = 0,82...0,90$), а также обратную зависимость прочности от пористости ($r = -0,80...-0,88$). SLS показывает наивысшую корреляцию ($r = 0,92$) из-за однородности структуры, тогда как для ВJ ($r = 0,78$) анизотропия снижает корреляцию.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между свойствами

Технология	Коэффициенты корреляции Пирсона (r)		
	r (сжатие/растяжение)	r (изгиб/сдвиг)	r (пористость/сжатие)
XTC	0,85	0,90	-0,88
VJ	0,78	0,82	-0,80
SLS	0,92	0,87	-0,85

Высокая корреляция между прочностными свойствами и обратная зависимость прочности от пористости подтверждают влияние микроструктуры материала, сформированной технологическим процессом.

Эксплуатационные свойства литейных стержней определяют их поведение на этапах заливки, затвердевания и выбивки. Оценка характеристик проводилась с учётом требований к минимизации дефектов отливок, таких как газовые поры, песчаные включения и поверхностные дефекты, включающие шероховатость, засоры и пригары. Результаты измерений эксплуатационных свойств стержней представлены в табл. 3.

Таблица 3

Эксплуатационные свойства литейных стержней

Технология	Термостойкость (остаточная прочность на сжатие при 600 °C, МПа)	Газопроницаемость, ед.	Газотворность, см ³ /г	Осыпаемость, %
XTC	2...5	23...27	10...15	0,7...1,2
VJ	1...3	20...22 (X/Y)	5...10	0,4...0,8 (X/Y)
		23...25 (Z)		0,8...1,2 (Z)
SLS	2...4	19...21	3...8	0,1...0,3

Термостойкость литейных стержней характеризует их способность сохранять структурную целостность и функциональные свойства при воздействии высоких температур (600...700 °C), характерных для литья алюминиевых сплавов. Этот параметр оценивался через остаточную прочность на сжатие после нагрева до заданной температуры с последующим охлаждением, что отражает термический цикл, испытываемый стержнем в процессе заливки и затвердевания.

Для стержней XTC, изготовленных с использованием фурановой смолы, остаточная прочность при 200 °C составляет 15 МПа, однако при 600 °C она снижается до 2...5 МПа. Это связано

с термическим разложением органического связующего, начинающимся при 250...300 °С, сопровождающимся выделением летучих продуктов (СО, СО₂, углеводородов), что разрушает полимерную матрицу. Стержни ВJ, выполненные с применением полимерной смолы типа FHZL XY-GS05, демонстрируют сходное поведение: прочность снижается с 10...12 МПа при 200 °С до 1...3 МПа при 600 °С из-за аналогичной термической деградации. В отличие от них стержни SLS, изготовленные из плакированного песка (SiO₂ ≥ 95 %) без органических связующих, обладают более высокой термической стабильностью: остаточная прочность сохраняется на уровне 4...5 МПа до 350 °С и снижается до 2...4 МПа при 700 °С. Термическое разупрочнение SLS-стержней происходит за счёт постепенных изменений в спечённой структуре песка, а не от резкого разложения связующего.

Результаты представлены на рис. 4. Для ХТС и ВJ наблюдается резкое разупрочнение после 250 °С, что указывает на ограниченную термостойкость, тогда как SLS отличается монотонным падением прочности и демонстрирует относительную стабильность до 350 °С, что подтверждает её пригодность для литья сложных отливок с высокими требованиями к термической устойчивости.

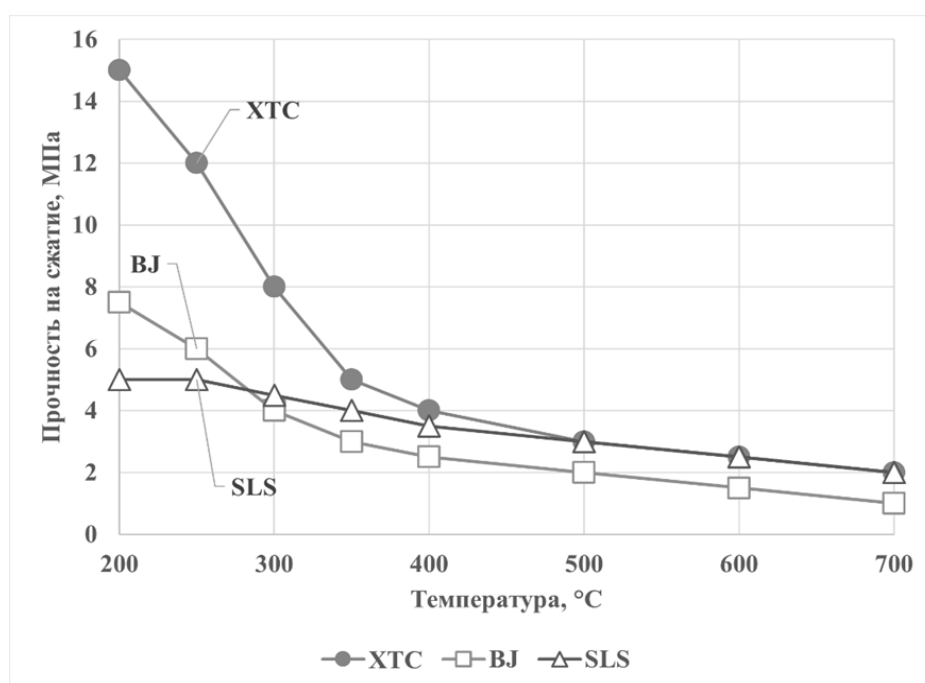


Рис. 4. Термостойкость стержней (остаточная прочность на сжатие от температуры нагрева)

Газопроницаемость определяет способность стержня отводить газы, образующиеся при контакте с расплавом, предотвращая образование газовых пор в отливках. Параметр зависит от пористости, размера пор и плотности материала.

На основе данных табл. 1-3, видно, что стержни ХТС обладают высокой газопроницаемостью (23...27 ед.), что обусловлено их рыхлой структурой с пористостью 35...40 % и крупными порами (50...200 мкм). Такая структура обеспечивает эффективный отвод газов, снижая риск газовых дефектов, но увеличивает склонность к осыпаемости.

Для ВJ отмечена анизотропия газопроницаемости: в плоскости XY (параллельно слоям) она составляет 20...22 ед. при пористости 30...35 %, а по оси Z (перпендикулярно слоям) возрастает до 23...25 ед. при пористости 35...40 %, что связано с послойной структурой, влияющей на распределение пор. Стержни SLS имеют наименьшую газопроницаемость – 19...21 ед., что связано с высокой плотностью (2,1...2,4 г/см³), низкой пористостью (5...12 %) и мелкими порами (10...50 мкм).

Из данных табл. 3 видно, что стержни ХТС имеют наибольшую газотворность – 10...15 см³/г, что связано с разложением фурановой смолы (1,0...1,2 масс. %), при температурах 600...700 °С выделяющей СО, СО₂ и углеводороды (метан, этан). Стержни ВJ имеют меньшую газотворность (5...10 см³/г) благодаря снижению содержанию полимерной смолы (2...3 мл/кг), причём этот параметр не зависит от направления (X, Y или Z), т. к. связующее распределено равномерно. SLS обладает минимальной газотворностью – 3...8 см³/г, что обусловлено отсутствием органического связующего.

Для ХТС-стержней значения О = 0,7...1,2 %. Стержни ВJ анизотропны по направлениям X/Y О = 0,4...0,8 %, а в Z-направлении возрастают значения до О = 0,8...1,2 %. Для SLS-стержней значения О = 0,1...0,3 %, что объясняется плотной структурой, сформированной тепловым воздействием и отсутствием органических компонентов, подверженных термическому разложению.

Корреляция газопроницаемости, газотворности, осыпаемости стержней представлена в виде диаграммы рассеяния на рис. 5.

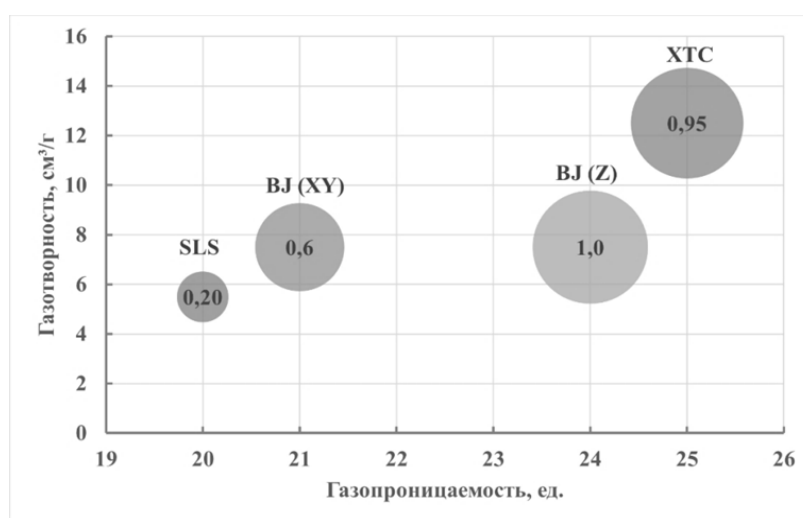


Рис. 5. Корреляция газопроницаемости, газотворности, осыпаемости стержней (осыпаемость пропорциональна размеру пузырька, значение осыпаемости (%) приведено в центре)

Эксплуатационные свойства литейных стержней тесно взаимосвязаны, определяя их поведение в процессе литья. Высокая газопроницаемость ХТС (23...27 ед.) компенсирует её значительную газотворность (10...15 см³/г), снижая риск газовых дефектов, но высокая осыпаемость (0,7...1,2 %) увеличивает вероятность песчаных включений, провоцируя брак. ВJ занимает промежуточное положение: умеренная газопроницаемость (20...25 ед.) и газотворность (5...10 см³/г) обеспечивают приемлемый отвод газов, но анизотропия осыпаемости (0,4...1,2 %) требует оптимизации ориентации стержней для снижения брака. SLS выделяется минимальной газотворностью (3...8 см³/г) и осыпаемостью (0,1...0,3 %), что минимизирует дефекты, но её низкая газопроницаемость (19...21 ед.) требует применения технологических решений по увеличению газоотвода из стержней.

Для визуализации результатов анализа выбраны шесть свойств, наиболее значимо влияющих на качество отливок. Нормирование значений свойств выполнено так, чтобы значения, близкие к 1, отражали наилучшее качество стержней. Для всех свойств максимальное среднее значение принято равным единице, а остальные выражены в долях единицы. Для отрицательных свойств значения, приведённые в табл. 4, инвертированы.

Лепестковая диаграмма на рис. 6 отражает вклад каждой технологии в снижение дефектности отливок, а площадь многоугольника свойств позволяет оценить комплексное влияние характеристик: чем больше площадь фигуры, тем лучше соответствующая технология по совокупности оцениваемых свойств для обеспечения качества отливок.

Таблица 4

Нормированные значения свойств для лепестковой диаграммы, положительно и отрицательно влияющих на качество отливок

Свойство	XTC	BJ (X/Y)	BJ (Z)	SLS
Осыпаемость (отр.) инвертировано	0,21	0,33	0,20	1,00
Газопроницаемость (пол.)	1,00	0,84	0,96	0,80
Газотворность (отр.) инвертировано	0,44	0,73	0,73	1,00
Плотность (пол.)	0,76	0,82	0,73	1,00
Термостойкость (пол.)	1,00	0,57	0,57	0,86
Прочность на изгиб (пол.)	0,96	0,66	0,52	1,00

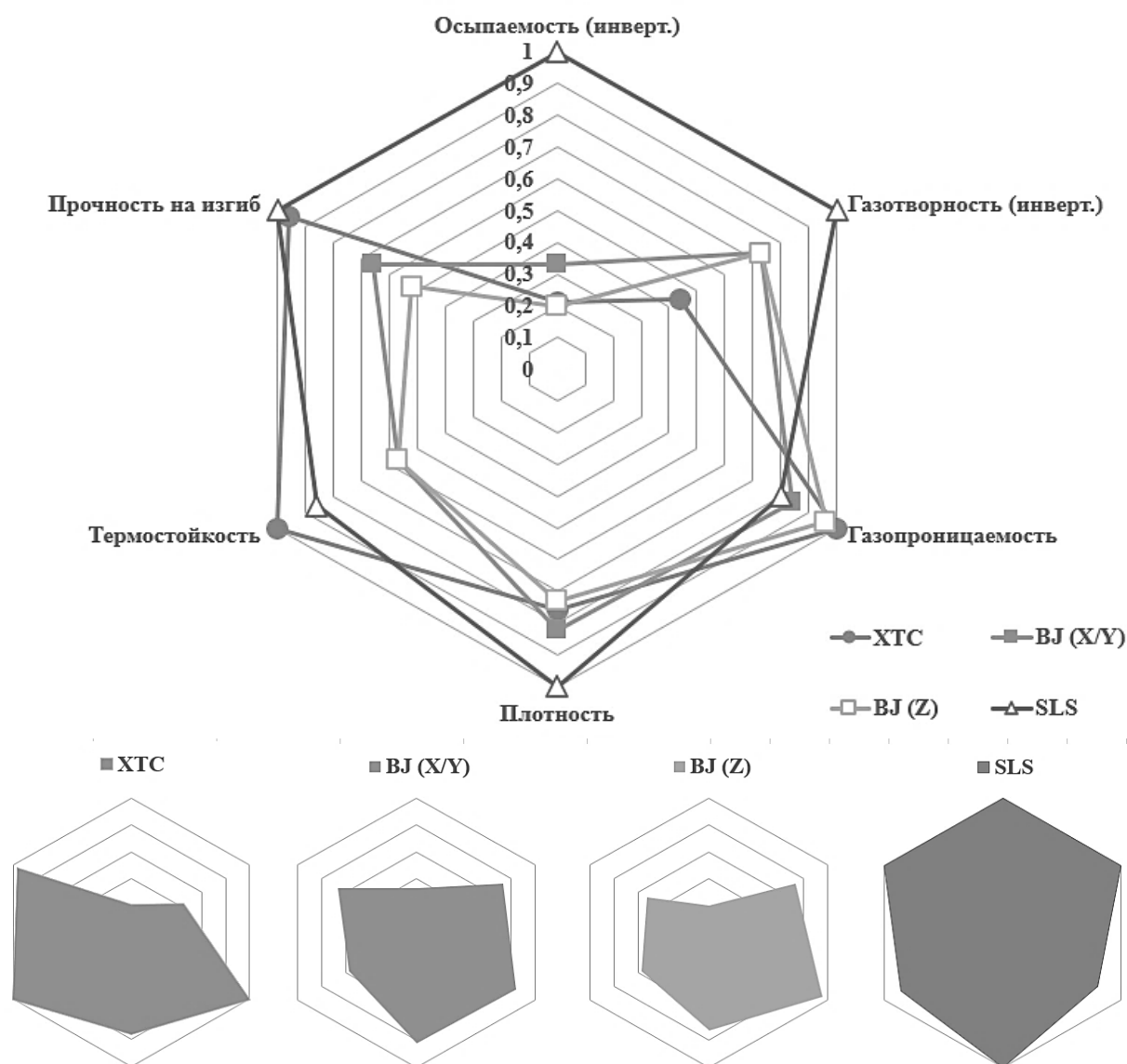


Рис. 6. Лепестковая диаграмма комплекса свойств, наиболее влияющих на качество отливок

Качество отливок оценивалось по трём видам дефектов: песчаные включения (обусловлены осыпаемостью и прочностью на изгиб), газовые поры (связаны с газопроницаемостью и газотвор-

ностью) и неровности поверхности (зависят от осыпаемости, плотности и структурной однородности). Определены основные свойства и их влияние на качество отливок:

1. Осыпаемость (отрицательное влияние): значения $O = 0,7...1,2\%$ для ХТС, $O = 0,8...1,2\%$ для ВJ в Z-направлении приводят к песчаным включениям и неровностям, $O = 0,1...0,3\%$ для SLS обеспечивает чистоту поверхности, снижая вероятность дефектов типа «пригар».

2. Газопроницаемость (положительное влияние): значения $\Gamma = 23...27$ ед. для ХТС, $23...25$ ед. для ВJ в Z-направлении снижает риск газовых пор, обеспечивая эффективный отвод летучих продуктов термического разложения связующего при заливке, $\Gamma = 19...21$ ед. для SLS увеличивает вероятность газовых дефектов.

3. Газотворность (отрицательное влияние): Высокая газотворность ХТС ($10...15 \text{ см}^3/\text{г}$) способствует образованию газовых пор за счёт интенсивного выделения газов при контакте с расплавом. Низкая газотворность SLS ($3...8 \text{ см}^3/\text{г}$) минимизирует этот риск.

4. Плотность (положительное влияние): Высокая плотность SLS ($2,1...2,4 \text{ г/см}^3$) минимизирует осыпаемость и неровности, обеспечивая высокую структурную целостность стержня. Низкая плотность ХТС ($1,6...1,8 \text{ г/см}^3$) и ВJ (Z) ($1,5...1,8 \text{ г/см}^3$) увеличивает хрупкость поверхности.

5. Термостойкость (положительное влияние): Высокая термостойкость ХТС ($2...5 \text{ МПа}$ при 600°C) и SLS ($2...4 \text{ МПа}$ при 700°C) снижает деградацию связующего, минимизируя газотворность и осыпаемость. Низкая термостойкость ВJ ($1...3 \text{ МПа}$) усиливает термическое разложение, повышая дефектность.

6. Прочность на изгиб (положительное влияние): $\sigma_{\text{и}} = 2,8...2,9 \text{ МПа}$ для SLS, $\sigma_{\text{и}} = 2,5...3,0 \text{ МПа}$ для ХТС предотвращает растрескивание стержней под действием усадочных напряжений, уменьшая песчаные включения и неровности. Низкая прочность $\sigma_{\text{и}} = 1,48 \text{ МПа}$ для ВJ в Z-направлении увеличивает риск дефектов.

На рис. 6 представлены четыре многоугольника, соответствующие технологиям ХТС, ВJ (X/Y), ВJ (Z) и SLS. Площадь многоугольника отражает совокупный вклад нормированных свойств в качество отливок: чем больше площадь, тем выше комплексная пригодность стержней для минимизации дефектов:

– SLS: Многоугольник SLS имеет наибольшую площадь благодаря максимальным значениям осыпаемости (1,00), газотворности (1,00), плотности (1,00) и прочности на изгиб (1,00). Это указывает на высокую структурную целостность стержней, минимальный риск песчаных включений и газовых пор, а также чистоту поверхности отливок. Умеренные значения термостойкости (0,86) и газопроницаемости (0,80) требуют дополнительных мер по улучшению вентилируемости формы, чтобы избежать газовых дефектов в сложных отливках.

– ХТС: Многоугольник ХТС образует меньшую площадь по сравнению с SLS, но высокие значения газопроницаемости (1,00), термостойкости (1,00) и прочности на изгиб (0,96) обеспечивают устойчивость к газовым порам и трещинам. Однако низкие значения осыпаемости (0,21) и газотворности (0,44) указывают на значительный риск песчаных включений, механического пригара и газовых пор, особенно в условиях недостаточной вентиляции. Умеренная плотность (0,76) дополнительно способствует хрупкости поверхности.

– ВJ (X/Y): Многоугольник ВJ в X/Y-направлении имеет меньшую площадь, чем у ХТС, из-за низких значений термостойкости (0,57) и прочности на изгиб (0,66), что повышает риск термического разложения связующего и растрескивания стержней. Однако более высокие значения осыпаемости (0,33) и газотворности (0,73) по сравнению с ХТС (0,21 и 0,44) обеспечивают меньший уровень песчаных включений и газовых пор. Умеренная плотность (0,82) и газопроницаемость (0,84) способствуют стабильности стержней и отводу газов.

– ВJ (Z): Многоугольник ВJ в Z-направлении имеет наименьшую площадь из-за низких значений прочности на изгиб (0,52) и термостойкости (0,57), что увеличивает риск дефектов при термическом воздействии расплава. Однако высокая газопроницаемость (0,96) и умеренные осыпаемость (0,20) и газотворность (0,73) делают эту ориентацию предпочтительной для снижения газовых пор по сравнению с ХТС.



Комплексная оценка технологий реализована по площади полученных многоугольников. Площадь каждого многоугольника отражает комплексный вклад свойств в качество отливок. Наибольшая площадь у SLS свидетельствует о её превосходстве в минимизации дефектов, что обусловлено высокой плотностью, прочностью на изгиб и низкими значениями осыпаемости и газотворности. ХТС, несмотря на высокие показатели газопроницаемости и термостойкости, уступает из-за значительного влияния осыпаемости и газотворности, которые приводят к песчаным включениям и газовым порам. При сравнении технологий ХТС и ВJ площадь многоугольника ВJ (особенно в Z-направлении) меньше, чем у ХТС, но технология ВJ имеет преимущества по анализу общей совокупности свойств, влияющих на качество отливок. Это обусловлено следующими факторами:

- Снижением песчаных включений. Более высокое нормированное значение осыпаемости у ВJ (0,33 в X/Y и 0,20 в Z) по сравнению с ХТС (0,21) указывает на меньший риск отделения песчинок, что снижает вероятность дефектов типа «механический пригар». Для алюминиевых сплавов АК7ч, склонных к образованию пригара, этот фактор имеет решающее значение.

- Уменьшением газовых пор. Нормированное значение газотворности у ВJ (0,73) выше, чем у ХТС (0,44), что означает меньшее выделение газов при контакте с расплавом. Это снижает риск газовых пор, особенно в условиях ограниченной вентиляции формы, где высокая газотворность ХТС становится критичной.

- Балансом свойств. Несмотря на низкие значения термостойкости и прочности на изгиб, ВJ компенсирует эти недостатки за счёт более сбалансированного сочетания осыпаемости и газотворности, что делает её предпочтительной для отливок с высокими требованиями к чистоте поверхности.

Помимо свойств, представленных на лепестковой диаграмме, на качество отливок влияют и другие характеристики стержней, такие как пористость, прочность на сжатие и размер пор:

- Пористость. Двойственное влияние П проявляется через связь с газопроницаемостью и осыпаемостью: для ХТС $P = 35...40\%$ и ВJ (Z) $P = 5...40\%$, это способствует отводу газов, снижая риск газовых пор, одновременно увеличивает осыпаемость и может привести к песчаным включениям. SLS с $P = 5...12\%$ минимизирует дефекты поверхности, но требует мер для предотвращения газовых дефектов.

- Прочность на сжатие: для ХТС $\sigma_{сж} = 10...20$ МПа через 24 ч обеспечивает устойчивость стержней к давлению расплава, предотвращая деформацию и разрушение; для ВJ $\sigma_{сж} = 5...10$ МПа в X/Y и для SLS $\sigma_{сж} = 3...7$ МПа также достаточны для большинства отливок, но анизотропия ВJ $\sigma_{сж} = 4...8$ МПа в Z может привести к локальным разрушениям, увеличивая риск дефектов.

- Размер пор. Крупные поры ХТС $P = 50...200$ мкм усиливают осыпаемость, тогда как мелкие поры SLS $P = 10...50$ мкм способствуют чистоте поверхности литья.

Эти свойства, хотя и не включены в диаграмму, играют важную роль в технологии, например, высокая прочность на сжатие ХТС превалирует над недостатками (осыпаемостью), тогда как низкая пористость SLS требует оптимизации конструкции формы стержней для улучшения газоотвода. Причины и прогнозируемая вероятность образования дефектов для каждой технологии на основании полученных зависимостей сведены табл. 5.

По данным табл. 5 видно, что технология SLS характеризуется минимальным риском возникновения дефектов из-за низких значений газотворности и осыпаемости, а ХТС и ВJ требуют дополнительных мер для снижения брака, связанного с газовыделением и осыпаемостью.

Применение технологии SLS совместно с конструктивным решением обеспечения полой конструкции стержней сложной геометрии в условиях литья из алюминиевых сплавов отливок, имеющих сложные полости и протяжённые тонкостенные каналы, показало значительные преимущества над всеми рассмотренными технологиями.

Таблица 5

Вероятность (риск) образования дефектов в отливках в зависимости от технологии изготовления стержней

Технология	Ключевые факторы риска	Вероятность образования дефектов			Рекомендации по снижению брака
		газовых	механических	трещин	
ХТС	$\Gamma = 10...15 \text{ см}^3/\text{г}$, $O = 0,7...1,2 \%$	Высокая (из-за газотворности)	Высокая (из-за осыпаемости)	Низкая ($\sigma_{\text{н}} = 0,96$)	Противопригарные покрытия
BJ (X/Y)	$\Gamma = 5...10 \text{ см}^3/\text{г}$, $O = 0,4...0,8 \%$	Средняя	Средняя	Средняя ($\sigma_{\text{н}} = 0,66$)	Оптимизация ориентации (X/Y)
BJ (Z)	$O = 0,8...1,2 \%$, $\sigma_{\text{н}} = 0,52$	Средняя	Высокая (из-за осыпаемости)	Высокая	Применять покрытия
SLS	$\Gamma = 19...21 \text{ ед.}$, газотворность $3...8 \text{ см}^3/\text{г}$,	Низкая	Минимальная (осыпаемость $0,1...0,3 \%$)	Низкое значение $\sigma_{\text{н}}$	Улучшать газоотвод

Выводы. Рассмотрены физико-механические и эксплуатационные свойства стержней и их влияние на дефекты, образующиеся в зоне контакта металл – литейный стержень на этапах изготовления стержней и формирования отливки. Определена степень влияния свойств на формирование внутренних поверхностей отливок.

Комплексным анализом установлено, что SLS обеспечивает наилучшие физико-механические (плотность $2,1...2,4 \text{ г/см}^3$, пористость $5...12 \%$, прочность на изгиб $2,8...2,9 \text{ МПа}$) и эксплуатационные (газотворность $3...8 \text{ см}^3/\text{г}$, осыпаемость $0,1...0,3 \%$, термостойкость до $700 \text{ }^\circ\text{C}$) характеристики, минимизируя дефекты отливок (брак $5...15 \%$, менее 5% с полыми стержнями и системой вентиляции формы с принудительной откачкой образующихся газов).

ХТС характеризуется высокой газопроницаемостью ($23...27 \text{ ед.}$) и прочностью на сжатие ($10...20 \text{ МПа}$), но значительная газотворность ($10...15 \text{ см}^3/\text{г}$) и осыпаемость ($0,7...1,2 \%$) увеличивают риск песчаных включений и газовых пор (брак $15...25 \%$).

BJ демонстрирует промежуточные свойства (газопроницаемость $20...25 \text{ ед.}$, газотворность $5...10 \text{ см}^3/\text{г}$, осыпаемость $0,4...1,2 \%$) с анизотропией ($10...20 \%$), что приводит к браку $10...18 \%$, особенно в Z-направлении.

Лепестковая диаграмма показала превосходство SLS по совокупности свойств (наибольшая площадь многоугольника), тогда как BJ (X/Y) превосходит ХТС только за счёт меньшего количества песчаных включений и газовых пор. На основании проведённого исследования разработаны практические рекомендации по выбору технологии изготовления стержней.

Технология послойного синтеза – готовое решение для печати стержней – позволяет сократить время технологической подготовки производства, время изготовления, повышает качество и плотность создаваемых стержней. В SLS-технологии изготовления стержней сконцентрированы передовые инженерные техники применения лазера, электронных автоматических систем управления, оптики и измерительных устройств, которые стимулируют развитие технологий получения порошковых смесей. Среди преимуществ технологии селективного спекания можно отметить её многофункциональность, т. к. она позволяет принтеру использовать разные виды порошковых расходных материалов. В качестве формовочных стержневых смесей, которые являются основным расходным материалом к таким принтерам, может быть использована большая номенклатура порошков при варьировании материалов как огнеупорной основы, так и связующих. Развитие литейной технологии в современных условиях потребует от специалистов создания новых отечественных формовочных и стержневых смесей, обладающих повышенной прочностью, которые пригодны для 3D-печати и работы в высокотемпературных условиях всестороннего сжатия, обладают высокой газопроницаемостью и низкой газотворностью.



ЛИТЕРАТУРА

1. Sabine Anzualda. Metal Producing Process: A Complete Guidelines to Manufacture: Advanced Metal Casting Ppt. 2021. 154 p.
2. Жуковский, С. С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник / С. С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 2010. – 256 с.
3. Mariusz Holtzer, Angelika Kmita. Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, – 2020. – 378 p.
4. Srinivasan M. Science and Technology of Casting Processes. London, UK: IntechOpen, – 2012. – 360 p.
5. Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, – 2020. – 816 p.
6. Пономаренко, О. И. Исследование прочностных свойств смоляных ХТС на хромитовых песках / О. И. Пономаренко, Е. В. Колесник, Н. С. Евтушенко // Литейное производство. – 2015. – № 3. – С. 5-7.
7. Кузнецов, И. А. Исследование влияния характеристик песчаной основы на свойства холоднотвердеющей смеси с фурановой смолой / И. А. Кузнецов, Г. Л. Хазан // Литейщик России. – 2015. – № 3. – С. 38-40.
8. Холоднотвердеющие смеси для No-Bake-процесса / Н. А. Кидалов, Н. А. Осипова, И. Е. Поташова, К. О. Рыбальченко, В. В. Лысоченко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 99-102.
9. Проблема выбиваемости стержней при производстве отливок из AL-сплавов COLD BOX AMIN-процессом / И. О. Леушин, А. В. Титов, К. А. Маслов, А. Ю. Субботин // Литейное производство. – 2020. – № 6. – С. 10-13.
10. Влияние высокодисперсного наполнителя в составе холоднотвердеющих смесей на её технологические свойства / В. Ю. Куликов, Св. С. Квон, А. М. Достаева, Е. П. Щербакова, С. К. Аринова, А. А. Алина // Литейщик России. – 2021. – № 3. – С. 15-17.
11. Исследование газотворности при термодеструкции холоднотвердеющих формовочных смесей / В. Е. Баженов, И. В. Плисецкая, А. В. Санников [и др.] // Литейное производство. – 2021. – № 4. – С. 5-11.
12. Burns T. A. The Foseco Foundryman's Handbook: Facts, Figures, and Formulae. 9th Ed. Amsterdam, Netherlands: Pergamon-Elsevier Science, – 2017. – 446 p.
13. Дорошенко, В. С. О послойном печатании песчаной формы с дифференцированной прочностью / В. С. Дорошенко // Литейное производство. – 2015. – № 4. – С. 19-25.
14. Исследование прочности и газопроницаемости литейных форм и стержней из холоднотвердеющих смесей, изготовленных методом послойного выращивания / Д. Э. Хилков, А. Ю. Банников, А. Ю. Коротченко, М. В. Тверской // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21. – № 6. – С. 243-246.
15. Исследование новых наполнительных материалов для 3D-печати литейных форм по INKJET технологии / А. А. Рижский, В. Е. Баженов, М. Б. Абдулазизов, А. С. Анищенко // Литейное производство. – 2024. – № 3. – С. 17-19.
16. Мирошниченко, В. С. Цифровые и аддитивные технологии в литейном производстве / В. С. Мирошниченко, Ю. И. Гутько, А. Н. Голофаев // Литейное производство. – 2023. – № 6. – С. 38-39.
17. Дорошенко, В. С. Три направления цифровизации литейного производства: виртуальный инжиниринг, цифровой двойник, аддитивные технологии / В. С. Дорошенко // Metallurgia машиностроения. – 2022. – № 1. – С. 37-40.

Мокрицкий Б. Я., Космынин А. В., Скрипилёв А. А., Сысоев О. Е.
B. Ya. Mokritskii, A. V. Kosmynin, A. A. Skripilev, O. E. Sysoyev

**ОБЛАСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СБОРНЫХ ФРЕЗ РАЗНЫХ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ
ВЫСОКОТВЁРДЫЙ СЛОЙ**

**AREAS OF RATIONAL USE OF PREFABRICATED MILLING CUTTERS FROM DIFFERENT
MANUFACTURERS FOR PROCESSING BLANKS OF PARTS WITH A HIGH-HARDNESS
LAYER**

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Professor, Consulting Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: boris@knastu.ru.

Космынин Александр Витальевич – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: avkosm@knastu.ru.

Aleksandr V. Kosmynin – Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: avkosm@knastu.ru.

Скрипилёв Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Skripilev.aal@email.knastu.ru.

Aleksandr A. Skripilev – PhD in Engineering, Associate Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: Skripilev.aal@email.knastu.ru.

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: susoev2023@mail.ru.

Oleg E. Sysoyev – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department «Construction and Architecture», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: susoev2023@mail.ru.

Аннотация. Ряд областей народного хозяйства нуждается в деталях изделий, материал которых имеет существенный градиент твёрдости от сердцевины материала (твёрдость на уровне HRC 40) к её наружному высокотвёрдому слою (твёрдость HRC 60 и выше). Необходимость обрабатывать фрезерованием высокотвёрдые слои ставит задачу поиска рациональных путей повышения работоспособности режущего инструмента. Обработка высокотвёрдого слоя на заготовках таких деталей требует соответствующего металлорежущего инструмента. В данной статье приведены результаты фрезерования такого высокотвёрдого слоя сборными фрезами разных производителей, а именно ООО СКИФ-М (Россия), Sandvik Coromant (Швеция), Mitsubishi (Япония).

Summary. A number of areas of the national economy require parts of products, the material of which has a significant hardness gradient from the core of the material (hardness at the HRC 40 level) to its outer high-hardness layer (hardness HRC 60 and higher). The need to process high-hardness layers by milling poses the task of finding rational ways to improve the efficiency of the cutting tool. The processing of a high-hardness layer on the workpieces of such parts requires an appropriate metal cutting tool. This article presents the results of milling such a high-hardness layer with prefabricated milling cutters from different manufacturers, namely LLC SKIF-M (Russia), Sandvik Coromant (Sweden), Mitsubishi (Japan).

Ключевые слова: фрезерование сборными фрезами, высокотвёрдый слой.

Key words: milling with prefabricated milling cutters, high-hardness layer.

УДК 621.9.2

Введение

Ряд областей народного хозяйства нуждается [1; 2] в деталях изделий, материал которых имеет существенный градиент твёрдости от сердцевины материала (твёрдость на уровне HRC 40) к её наружному высокотвёрдому слою (твёрдость HRC 60 и выше). Обработка высокотвёрдого слоя на заготовках деталей требует соответствующего металлорежущего инструмента. В данной статье приведены результаты фрезерования такого высокотвёрдого слоя сборными фрезами разных производителей.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования являются указанные ниже фрезы трёх разных производителей, а именно их период стойкости в зависимости от условий эксплуатации.

Использован экспериментальный метод исследования, т. е. непосредственное фрезерование заготовок деталей, содержащих высокотвёрдый слой, и последующее измерение величины износа режущих пластин. Такой метод исследования типичен [3–6] для процессов резания.

Оценку качества обработанной поверхности не выполняли. Однако при предварительных настроечных испытаниях установили, что при превышении износа зубьев фрез более 0,5 мм параметры шероховатости Ra и Rz не удовлетворяли требованиям.

Особенность методики состояла в том, что при экспериментах использовались заготовки деталей, на которых высокотвёрдый слой имел ограниченную протяжённость. Он располагался на заготовке детали длиной 1030 мм. Ширина такого слоя составляла 80 мм. Это позволяло обработать высокотвёрдый слой при постоянной глубине в виде трёх дорожек, а именно обработать фрезой (например, диаметром 25 мм) одну дорожку на длину 1030 мм, сместить стол станка с заготовкой в поперечном направлении (на 26 мм), обработать вторую дорожку и затем третью дорожку. Направление продольного перемещения стола станка изменяли для встречного и попутного фрезерования [7; 8]. Так повторяли при глубине резания 1,0 мм, 1,5 мм, 2,0 мм, 2,5 мм и 3,0 мм. Толщина высокотвёрдого слоя 10 мм позволяла фрезеровать такие дорожки многократно. При каждой из глубин резания использовали ресурс режущих сменных пластин следующим образом. После достижения предельной допустимой величины износа режущих пластин в одном из их положений все пластины поворачивали вокруг своей оси на корпусе фрезы и осуществляли резание. Таким образом поочерёдно вели обработку каждой из сторон режущих пластин.

Полученные результаты

На рис. 1, а показано фото российской сборной фрезы модели MT110-025225R02S009-ИК-Т. Разработчик фрезы и производитель ООО СКИФ-М (г. Белгород). Это фреза диаметром 25 мм с двумя зубьями, на которых закреплены квадратные твёрдосплавные типовые режущие пластины, которые можно поворачивать вокруг своей оси.

На рис. 1, б представлена шведская сборная фреза (головка) модели CoroMill R210 (внешний вид заимствован из интернета в связи с тем, что фото натуральной фрезы запрещено). Фреза имеет диаметр 30 мм, 6 зубьев с квадратными сменными режущими пластинами.

На рис. 1, в представлена японская сборная фреза (головка диаметром 30 мм) модели Wincat ICATPM 102020100 (внешний вид заимствован из интернета в связи с тем, что фото натуральной фрезы запрещено). Фреза имеет 5 зубьев с трёхгранными сменными режущими пластинами.

Указанные фрезы трёх разных производителей отличаются конструкцией, но их объединяет то, что они предназначены для фрезерования труднообрабатываемых материалов [9; 10].

При их испытаниях не ставилась задача выявить из них лучшую по тому или иному эксплуатационному параметру. Цель исследования состояла в том, чтобы для каждой из них выявить наиболее рациональные области применения по периоду стойкости режущих пластин при фрезе-

ровании высокотвёрдого слоя, напавленного на поверхность заготовки детали. Внешний вид такого слоя представлен на рис. 2.

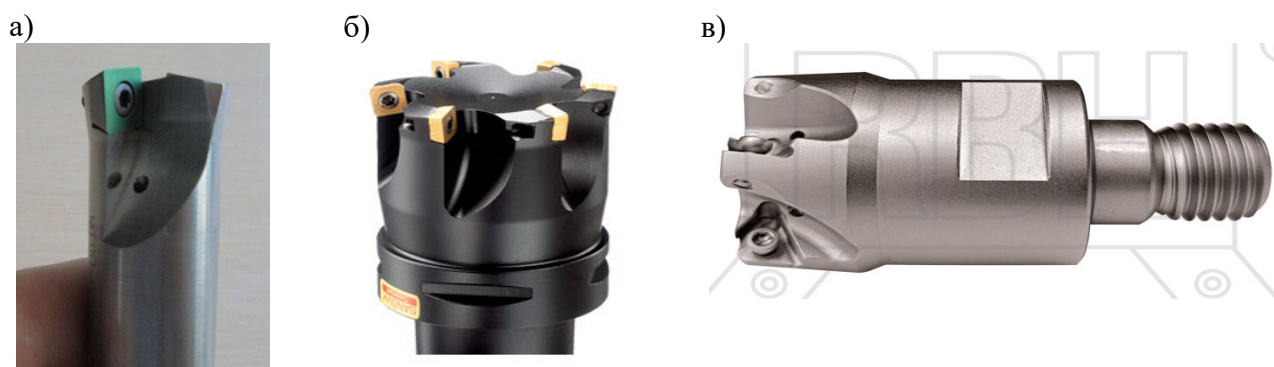


Рис. 1. Режущая часть отечественной фрезы модели MT110-025225R02S009-ИК-Т фирмы СКИФ-М (а); фреза (сменная головка) CoroMill R210 шведской фирмы Sandvik Coromant (б) и фреза Wincstar ICATPM 102020100 японской фирмы Mitsubishi (в)

Высота наплавки составляла 10 мм, твёрдость HRC 68. При нанесении высокотвёрдых слоёв использована наплавочная порошковая проволока марки ПП-АН167, изготовленная по ТУ У28.7-2149243-021.2008. Для нанесения наплавки использовали установку дуговой сварки модели TST 350, дополненную сварочным полуавтоматом модели ПДГ0-527-4А (производитель ООО ПКФ «Кристалл», диаметр проволоки 1,8 мм, напряжение 36 В, ток 220...240 А).

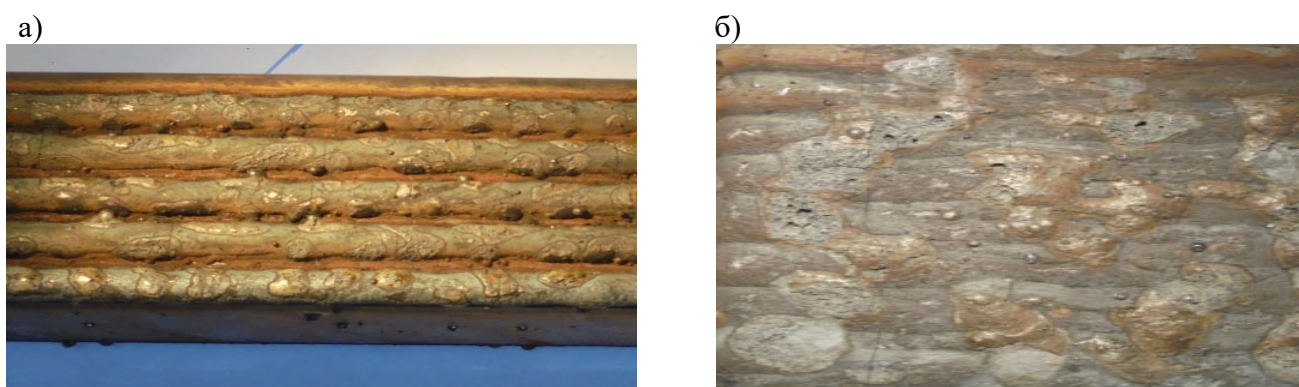


Рис. 2. Внешний вид разных вариантов высокотвёрдых слоёв (наплавки): а – с разрядкой, т. е. с расстоянием между рядами наплавки; б – сплошная наплавка

Фрезеровали при скорости резания 50 м/мин, при подаче на зуб фрезы 0,05 мм, при разных глубинах резания. Контролировали величину износа режущих пластин по задней поверхности. Для измерения величины износа использовали высокоточный мультисенсорный видеокамерный прибор модели Micro Vu Sol 161.

Обобщённые результаты оценки работоспособности исследуемых фрез приведены в табл. 1.

Данные, приведённые в табл. 1, позволяют сделать следующие выводы:

1. Применение исследуемых фрез рационально до глубины резания 2,5 мм. На этом интервале глубин резания период стойкости выше у фрезы фирмы Sandvik Coromant. Периоды стойкости у фрез СКИФ-М и Mitsubishi сопоставимы с незначительным превосходством СКИФ-М.

Из этого следует, что области рационального применения фрез СКИФ-М и Mitsubishi совпадают. Эти фрезы не следует применять при глубинах резания более 2,5 мм.



Таблица 1

Период стойкости режущих пластин фрез до достижения износа 0,5 мм при разных глубинах резания

Исследуемые фрезы	Период стойкости, мин	Примечания
Глубина резания 1,0 мм		
Фреза СКИФ-М	12	
Фреза фирмы Sandvik Coromant	14	
Фреза фирмы Mitsubishi	11	
Глубина резания* 1,5 мм		
Фреза СКИФ-М	10	
Фреза фирмы Sandvik Coromant	13	
Фреза фирмы Mitsubishi	9	
Глубина резания* 2,0 мм		
Фреза СКИФ-М	7	
Фреза фирмы Sandvik Coromant	9	
Фреза фирмы Mitsubishi	7	
Глубина резания* 2,5 мм		
Фреза СКИФ-М	4	Искрение и вибрации
Фреза фирмы Sandvik Coromant	6	
Фреза фирмы Mitsubishi	3	Искрение и вибрации
Глубина резания 3,0 мм		
Фреза СКИФ-М	скол пластин	
Фреза фирмы Sandvik Coromant	2	Искрение и вибрации
Фреза фирмы Mitsubishi	скол пластин	

Примечание:

*Увеличение глубины фрезерования производилось на участке высокотвёрдого слоя, который был только что обработан при предыдущей глубине резания. Это изменяло условия обработки, но этим пренебрегали.

2. В интервале глубин резания от 2,5 мм до 3,0 мм фреза фирмы Sandvik Coromant вне конкуренции, она превосходит по периоду стойкости остальные фрезы.

При глубине резания 3,0 мм фреза фирмы Sandvik Coromant ещё работоспособна, но период её стойкости мал, в связи с этим рациональной областью применения фрезы фирмы Sandvik Coromant следует считать фрезерование с глубиной резания от 1,0 мм до 3,0 мм.

Полученные результаты не противоречат результатам, изложенным в работах [11–17].

Заключение

Исследование позволило выявить области рационального применения для каждой из исследуемых фрез.

Периоды стойкости у фрез СКИФ-М и Mitsubishi сопоставимы с превосходством фрезы СКИФ-М. Их области рационального применения при глубине резания от 1,0 мм до 2,0 мм.

Область применения фрезы фирмы Sandvik Coromant более широкая – фрезерование с глубиной резания от 1,0 мм до 3,0 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, А. В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: библиотека технолога / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, А. Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
2. Механика нагружения поверхности волной деформации / А. Г. Лазуткин, А. В. Киричек, Ю. С. Степанов, Д. Л. Соловьев. – М.: Машиностроение, 2005. – 150 с.

3. Сариков, М. Ю. К вопросу исследования пробы при электроэрозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сариков, Д. А. Палкин, М. В. Минаков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 83-92.
4. Сариков, М. Ю. Исследование процессов в межэлектродном промежутке при электроэрозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сариков, У. Е. Решетник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 101-108.
5. Мокрицкий, Б. Я. Управление фрезерованием высокотвёрдых заготовок / Б. Я. Мокрицкий, А. А. Скрипилёв // Вестник машиностроения. – 2022. – № 12. – С. 72-75.
6. Пример диагностики технологической системы резания при фрезеровании материалов высокой твёрдости / Б. Я. Мокрицкий, А. В. Космынин, А. А. Скрипилёв, Т. Б. Ершова, П. А. Саблин // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26. – № 4. – С. 60-66.
7. Сотова, Е. С. Керамические режущие инструменты / Е. С. Сотова, А. А. Верещака, А. С. Верещака. – М.: Изд-во ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013. – 148 с.
8. Grigoriev S., Vereschaka A., Milovich F., Tabakov V., Sitnikov N., Andreev N., Sviridova T., Bublikov J. Investigation of multicomponent nanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb and Al // Surface and Coating Technology. 2020. V. 401. Art. No. 126258. DOI: 10.3390/coatings10121236.
9. Vereschaka A. A., Grigoriev S. N., Naumov A. G., Sotova E. S., Kirilov A. K., Bublikov J. I. Nanoscale multi-layered composite coating – applications for comashining // In: Handbook of modern Coating Technologies: Applications and Development. Editors: Mahmood Aliofkhazraei Ali Nasaan Chipara Nadhira Bensaada Laidani Jeff Th.M/ De Hosson. Elsevier: 1st edition. 2021. ISBN:9780444632371.
10. Vereschaka A. A., Grigoriev S. N., Sitnikov N. N., Bataka A. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coating and their influence on cutting tool life // Wear. 2017. Vol. 390-391. P.209-219. DOI: 10.1016/j.wear.2017.07.021.
11. Верещака, А. А. Многослойные композиционные наноструктурированные покрытия режущего инструмента, работающего в тяжёлых условиях / А. А. Верещака, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 12. – С. 3-11.
12. Табаков, В. П. Использование многослойных покрытий для повышения работоспособности режущего инструмента, работающего в стеснённых условиях / В. П. Табаков, С. С. Порохин // Металлообработка. – 2010. – № 3. – С. 40-44.
13. Huajie Chen, Aihui Zhou. Orbital-free Density Functional Theory for Molecular Structure Calculations. Numerical Mathematics: Theory, Methods Applications, 2008, 1, 1-28.
14. Механика деформирования и разрушения при резании / Б. В. Барбышев, У. С. Путилова, Р. Ю. Некрасов и др.; под ред. М. Х. Утешева. – Т. I. Нестационарный процесс резания. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – 212 с.
15. Wang N., Zhang G., Ren L., Pang W., Wang Y. Vision and sound fusion-based material removal rate monitoring for abrasive belt grinding using improved LightGBM algorithm. Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 66. P. 281-292.
16. Alexey A. Vereschaka, Vladislav Y. Vereshchagin, Nikolay N. Sitnikov, Gaik V. Oganyan, Anatoly Yu. Aksenenko, Boris J Mokritskii. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates. Journal of Nano Research. Vol. 45 (2017) pp. 110-123.
17. Zhang, H. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions / H. Zhang, Z. Deng, Y. Fu, L. Lv, C. Yan // J. Clean. Prod. 148 (2017) 174-184.

Белова И. В.
I. V. Belova

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ГИЛЬЗЫ ГИДРОЦИЛИНДРА

IDENTIFICATION OF THE CAUSES OF DESTRUCTION OF THE HYDRAULIC CYLINDER LINER

Белова Инна Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: inna_belova@mail.ru.

Inna V. Belova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Materials Science and Technologies of New Materials, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: inna_belova@mail.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты макроскопического и микроструктурного исследований фрагментов разрушенной гильзы гидроцилиндра. Разрушение произошло при испытании пробным давлением 150 бар. Был выполнен спектральный анализ фрагментов для идентификации марки материала. Обнаружено, что гильза изготовлена не из заявленного материала. Установлено, что причиной разрушения гильзы гидроцилиндра является отсутствие термической обработки данного материала.

Summary. The article presents the results of a macroscopic and microstructural study of fragments of a destroyed hydraulic cylinder liner. The destruction occurred during the test with a test pressure of 150 bar. A spectral analysis of the fragments was performed to identify the brand of the material. It was found that the sleeve was not made of the declared material. But the reason for the destruction of the cylinder liner was the lack of heat treatment of this material.

Ключевые слова: разрушение, микроструктура, неметаллические включения, излом.

Key words: destruction, microstructure, non-metallic inclusions, fracture.

УДК 620.186

Введение

Гильза гидроцилиндра является важным элементом гидросистемы, который должен выдерживать высокие нагрузки, высокое внутреннее давление и обеспечивать герметичность. Обычно для изготовления гильз гидроцилиндров используют среднеуглеродистые стали 35, 40Х, 45 с термической обработкой, повышающей их твёрдость и прочность. Изготовление гильзы – это сложный процесс, требующий соблюдения технологических норм и стандартов. Для предотвращения хрупкости выполняется выбор соответствующего вида термической обработки. Применение сталей с большим содержанием углерода может привести к повышенной хрупкости. Например, сталь 55 обладает высокой прочностью, но требует тщательной термической обработки для предотвращения хрупкости. При обработке важно учитывать, что сталь 55 склонна к образованию трещин при неправильной закалке [1].

Для значительного повышения прочности и износостойкости гильзы цилиндра применяется термическая обработка, включающая закалку и отпуск. Закалка осуществляется путём нагрева до температуры 800...850 °С с последующим интенсивным охлаждением в закалочной среде, в качестве которой может выступать масло или вода [1]. Данный процесс обеспечивает мартенситное превращение структуры стали, повышая её твёрдость. Далее следует отпуск при температуре 400...500 °С, предназначенный для снятия внутренних напряжений, возникающих в процессе закалки, и повышения пластичности материала [2]. В результате термической обработки формируется структура троостита, характеризующаяся оптимальным сочетанием прочности, твёрдости и пластичности, что обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики гильзы [3].

Обычно выполняется термическая обработка, позволяющая обеспечить твёрдость 45...55 HRC.

После термической обработки проводится контроль качества – проверка геометрических размеров (диаметр, длина, соосность), проверяется твёрдость поверхности, выполняется ультразвуковой или магнитопорошковый контроль для выявления скрытых дефектов [4].

Методика проведения эксперимента

Основными задачами макроанализа являются: идентификация типа разрушения (усталостное, хрупкое, вязкое и т. д.), определение мест зарождения трещин, оценка скорости распространения трещин, а также выявление факторов, способствовавших инициированию и развитию разрушения. Особое внимание уделяется исследованию поверхности излома, поскольку она несёт информацию о механизмах разрушения и условиях, в которых оно происходило.

Определение элементного состава исследуемого материала было выполнено методом оптико-эмиссионной спектрометрии с использованием спектрометра Q4 TASMAN 170 фирмы Bruker. Данный метод, основанный на анализе спектра излучения возбуждённых атомов, обеспечивает высокую точность и чувствительность при определении концентрации различных элементов в образце.

Количественная оценка загрязнённости металла гильзы неметаллическими включениями выполнена по ГОСТ 1778-2022 «Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений» [5] методом Ш, регламентирующим оценку по шкале эталонов при увеличении 100 крат. Оценка производилась путём сравнения наблюдаемых полей зрения с эталонными микрофотографиями, представленными в ГОСТ 1778-2022, для каждого типа включений (сульфиды, оксиды глобулярные, оксиды строчечные, силикаты хрупкие, силикаты деформирующиеся). Определялся балл для каждого типа включений в соответствии с их морфологией, размером и количеством на единицу площади.

Для анализа микроструктуры из места излома был вырезан образец, из которого изготовлен шлиф. После полировки шлиф был протравлен в 4%-ном спиртовом растворе HNO_3 . Микроструктурный анализ проводился с помощью микроскопа Axiovert 40 MAT (в ручном режиме) при увеличениях $\times 100$ и $\times 500$.

Твёрдость определялась на вырезанных образцах методом Бринелля по ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю» [6].

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты спектрального анализа образца, полученного для исследования. Химический состав соответствует среднеуглеродистой конструкционной стали марки 55.

Таблица 1

Химический состав материала, массовая доля
в процентах

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
0,56	0,67	0,30	0,032	0,040	0,07	0,05	0,08

Разрушение гильзы произошло в месте, которое расположено между корпусом гильзы и рубашкой охлаждения. Разрушение привело к разрыву резьбового выступа. Центральная часть излома показана на рис. 1. Зона разрушения проходит вдоль стенки гильзы, пересекая резьбовое соединение.

На рис. 2 показаны обломки (разрушенные фрагменты, отрезанные от изделия).

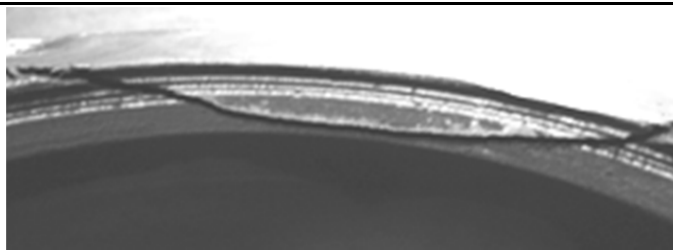


Рис. 1. Очаг разрушения

На рис. 3 можно увидеть, как проводились замеры выступающей части гильзы над охлаждающей рубашкой. В результате замеров было установлено, что высота выступающей части гильзы варьируется в пределах 30...36 мм. Это расхождение в показателях может свидетельствовать о несоосности между гильзой и охлаждающей рубашкой, что в свою очередь может негативно сказаться на эффективности работы всей системы охлаждения.

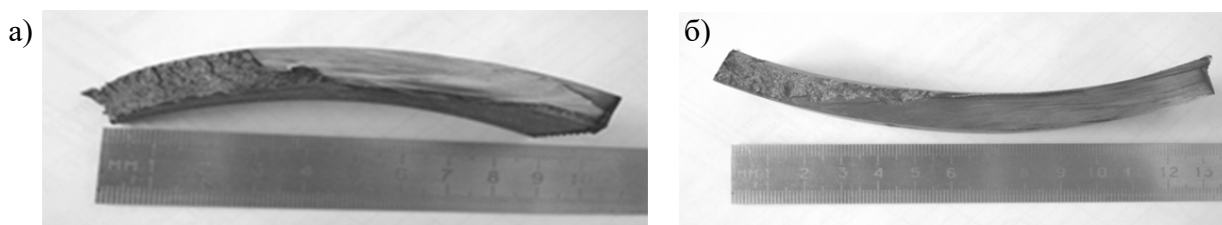


Рис. 2. Оторванная часть гильзы: а – первый фрагмент; б – второй фрагмент

Несоосность деталей может приводить к неравномерному распределению тепла, что в конечном итоге может вызвать перегрев отдельных компонентов и, как следствие, сокращение срока службы оборудования. Кроме того, подобные несоответствия могут указывать на недостатки в процессе производства или монтажа.

В ходе механических и технологических испытаний образцы для анализа были вырезаны из гильзы вдоль её продольной оси. Визуальный осмотр выявил существенную неравномерность толщины стенок. Это неоднородное распределение толщины наблюдалось как вдоль каждого отдельного образца, так и при сравнении разных образцов между собой (см. рис. 4). Замеры показали, что толщина стенки гильзы варьируется в диапазоне 17,6...21,9 мм. Такой значительный разброс значений (более 4,3 мм) указывает на потенциальные проблемы в процессе изготовления гильзы. Возможные причины неравномерности толщины стенок гильзы могут быть связаны с несколькими факторами. Во-первых, это может быть следствием нестабильной работы оборудования, используемого для литья или при механической обработке металла. Например, неравномерное давление в пресс-форме или неточности в настройках станка могут привести к образованию участков с разной толщиной. Во-вторых, некачественное исходное сырьё, имеющее внутренние неоднородности по составу и структуре, также может способствовать появлению дефектов. Наличие примесей или включений в металле также может оказать существенное влияние на характер кристаллизации и формирование структуры, что отражается на конечной толщине стенки. В-третьих, несоблюдение технологического процесса термической обработки, неверный выбор температурного режима могут привести к деформациям и изменению толщины стенки.

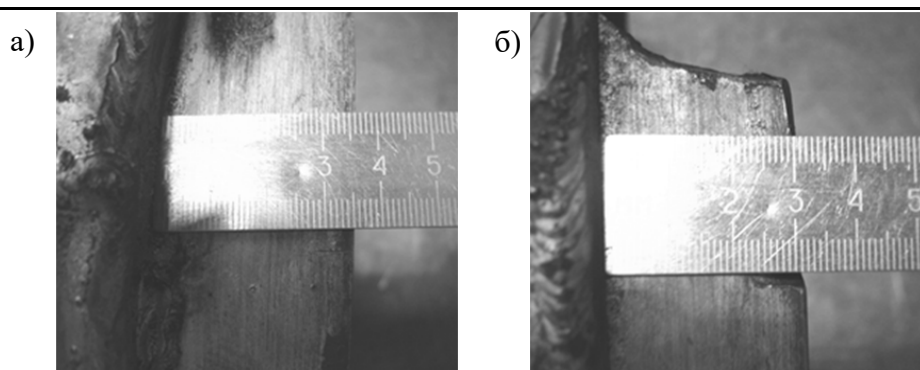


Рис. 3. Замеры выступающей части гильзы над охлаждающей рубашкой: а – первый фрагмент; б – второй фрагмент

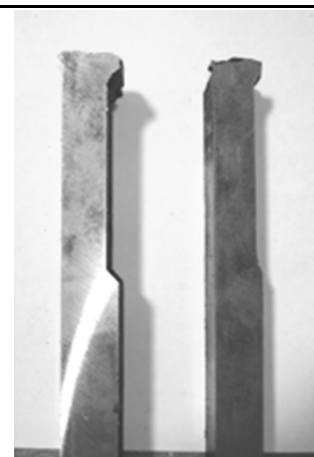


Рис. 4. Образцы для механических испытаний

На рис. 5 показаны фотографии изломов крупным планом. Изломы имеют качественную схожесть, однородны, без лучеобразных рубцов. Поверхность излома, образовавшаяся при разрушении, состоит из светло-серых блестящих плоских поверхностей без признаков макроскопической пластической деформации. Образующиеся поверхности излома характерны для литых и деформированных сталей и являются кристаллическими (хрупкими). Стали с кристаллическими изломами имеют низкую ударную вязкость.

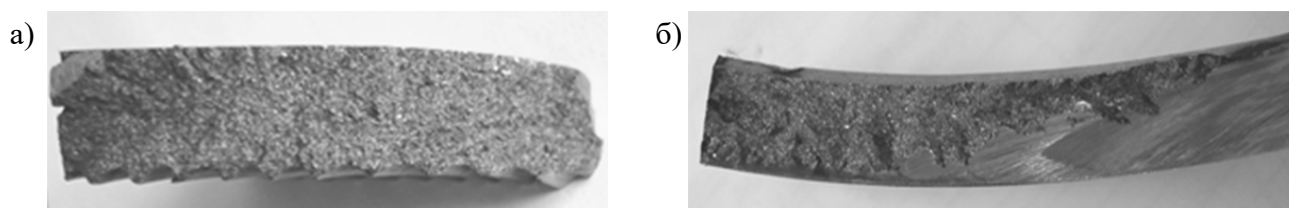


Рис. 5. Изломы представленных фрагментов: а – первого фрагмента; б – второго фрагмента

При количественной оценке загрязнённости металла гильзы выявлены неметаллические включения в виде сульфидов – 2 балла и точечных оксидов – 1 балл (см. рис. 6).

Для проведения последующего микроструктурного анализа шлиф протравили в 4%-ном спиртовом растворе HNO_3 . Микроструктура металла неоднородная феррито-перлитная (см. рис. 7). Соотношение фаз: перлит – 80 %, феррит – 20 %. Перлит пластинчатый, феррит в виде сетки.

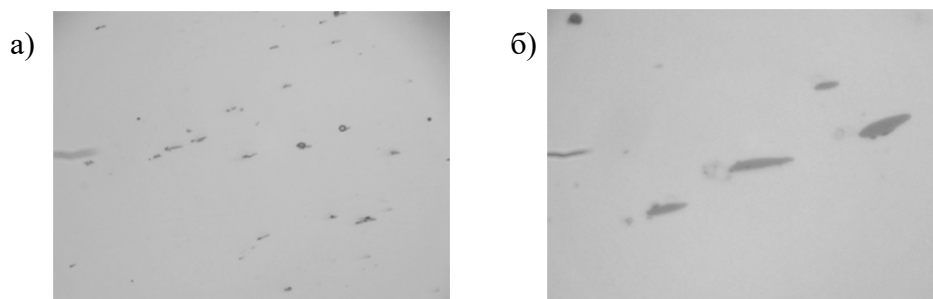


Рис. 6. Неметаллические включения: а – увеличение $\times 100$; б – увеличение $\times 500$

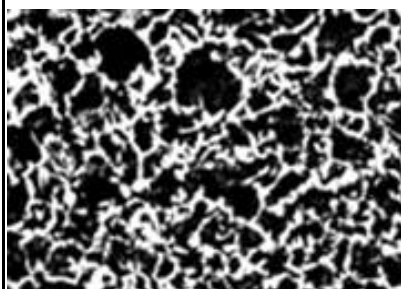


Рис. 7. Микроструктура стали 55, увеличение $\times 340$

Выявлена грубая разнотолщинность металла. Величина зерна находится в пределах 1...6 баллов шкалы ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» [7]. Термообработка отсутствует. При микроанализе в данных фрагментах гильзы трещин не выявлено. Значение твёрдости – 216...217 НВ.

Заключение

1. Гильза гидравлического цилиндра изготовлена из стали марки 55, что не соответствует общепринятым требованиям. Чаще всего при производстве гильз гидроцилиндра применяют марки 35, 40Х и 45. Однако выбор материала зависит от требований заказчика, условий, в которых будет использован цилиндр, а также нагрузок, с которыми он будет сталкиваться в ходе работ.

2. Твёрдость металла гильзы составляет 216...217 НВ. Это является низким показателем в сравнении с рекомендуемым 45...55 HRC (430...500 НВ).

3. Разрушение гильзы произошло в результате образования хрупкого излома без признаков макроребрастости деформации.

4. По произведённым замерам геометрических размеров фрагментов гильзы выявлена разнотолщинность стенки гильзы (17,6...21,9 мм). Разрыв произошёл в наиболее тонком месте.

5. Металл гильзы не подвергался термообработке, о чём свидетельствуют низкая твёрдость, неоднородность металла и наличие разнотолщинности (величина зерна 1...6 балла). Дополнительных трещин в местах, исключая зону разрушения, на гильзе не выявлено. Это может свидетельствовать о том, что разрушение не было вызвано множественными дефектами, сформировавшимися в процессе эксплуатации, и не имеет признаки усталостного разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А. П. *Металловедение: учеб. для вузов* / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Лахтин, Ю. М. *Металловедение и термическая обработка металлов* / Ю. М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1993. – 448 с.
3. Новиков, И. И. *Теория термической обработки металлов* / И. И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
4. *Методы структурного анализа материалов* / О. В. Башков, А. А. Бурдасова, И. В. Белова [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. – 60 с.
5. ГОСТ 1778-2022. *Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2022 г. № 1640-ст: взамен ГОСТ 1778-70: дата введения 2023-06-01* / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И. П. Бардина». – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 52 с.
6. ГОСТ 9012-59. *Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю = Metals. Method of Brinellhardness measurement: межгосударственный стандарт: издание официальное: введён впервые: дата введения 1960-01-01* / разработан и внесён Министерством чёрной металлургии СССР. – М.: Стандартиформ, 2007. – 42 с.
7. ГОСТ 5639-82. *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна = Steels and alloys. Methods for detection and determination of grain size: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26.08.82 № 3394: взамен ГОСТ 5639-65: дата введения 1983-01-01* / разработан и внесён Министерством чёрной металлургии СССР. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 21 с.
8. Сапожник, К. Р. Влияние сверхмногоциклового нагружения на структуру и микротвёрдость стали 45 / К. Р. Сапожник, И. Ч. Божоев, О. В. Башков // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2023. – № I (65). – С. 116-122.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICS

Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л., Канашин И. В.
Ya. Yu. Grigoriev, A. L. Grigorieva, I. V. Kanashin

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ О ВДАВЛИВАНИИ КЛИНА В ВЫПУКЛУЮ ЗАГОТОВКУ

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF PRESSING A WEDGE INTO A CONVEX WORKPIECE

Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, и. о. проректора по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

Yan Yu. Grigoriev – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: naj198282@mail.ru.

Anna L. Grigorieva – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: naj198282@mail.ru.

Канашин Илья Валерьевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

Ilya V. Kanashin – a Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

Аннотация. В данной работе рассматривается задача о внедрении плоского клина в выпуклую заготовку криволинейной формы. В ходе решения задачи, поставленной авторами работы, определяется система уравнений для нахождения угла раскрытия центрированного веера в жесткопластической области и координат точек, лежащих на пересечении клина и деформированной поверхности, а также деформированной и недеформированной поверхностей. Также в работе выводится система дифференциальных уравнений, позволяющая найти функцию, описывающую форму деформированной поверхности выдавленного материала, с помощью которой можно точно определить геометрическую границу области. Далее авторами с помощью полученных выше систем дифференциальных уравнений и функции, характеризующей геометрию изменения деформируемой границы выпуклой формы, описывается алгоритм нахождения нагрузки, необходимой для внедрения клина в выпуклую заготовку. При этом клин может изготавливаться из различных материалов в зависимости от постановки задачи и требуемого практического применения. Также в работе предлагается аналитическое решение системы дифференциальных уравнений для определения времени, затрачиваемого на внедрение клина до момента обращения угла раскрытия веера характеристик в нуль. В статье решается типовая задача (о внедрении клина в гиперболический цилиндр), с помощью которой демонстрируется аналитическое решение определения нагрузки и уравнения для деформируемой границы заготовки в области внедрения клина. В работе показывается, что, зная уравнения движения выпираемой границы тела и используя определённое напряжённо-деформируемое состояние в области деформирования, можно определить площадь области, которая будет подлежать выпячиванию.

Summary. In this paper, the problem of embedding a flat wedge into a convex workpiece of a curved shape is considered. In the course of solving the problem posed by the authors of the work, a system of equations is determined to find the opening angle of a centered fan in a rigid plastic region and the coordinates of points lying at the intersection of the wedge and the deformed surface, as well as deformed and undeformed surfaces. Also in the work, a system of differential equations is derived, which allows us to find a function describing the shape of the deformed surface of the extruded material, with which it is possible to accurately determine the geometric boundary of the region. Further, the authors, using the systems of differential equations obtained above and a function characterizing the geometry of the change in the deformable boundary of a convex shape, describe an algorithm for finding the load necessary for embedding a wedge into a convex workpiece. In this case, the wedge can be made of various materials, depending on the task statement and the required practical application. The paper also proposes an ana-

lytical solution to a system of differential equations to determine the time spent on the introduction of a wedge, until the angle of opening of the fan of characteristics turns to zero. The article solves a typical problem (about embedding a wedge into a hyperbolic cylinder), which demonstrates an analytical solution for determining the load and the equation for the deformable boundary of the workpiece in the area of wedge embedding. The paper shows that, knowing the equations of motion of the bulging boundary of the body and using a certain stress-strain state in the deformation region, it is possible to determine the area that will be subject to bulging.

Ключевые слова: жесткопластическое тело, плоский клин, плоская деформация, выпуклая заготовка, вдавливание, гиперболический цилиндр.

Key words: rigid-plastic body, flat wedge, plane deformation, convex workpiece, indentation, hyperbolic cylinder.

УДК 531

Введение. Клин с углом раствора 2θ внедряется в выпуклую заготовку криволинейной формы. В результате внедрения часть материала выдавливается и форма заготовки изменяется. Поле линий скольжения состоит из трёх областей (см. рис. 1). Две из них – ABD и AEC – имеют треугольную форму, оба семейства линий скольжения в них прямолинейны; третья область – центрированный веер ADE .

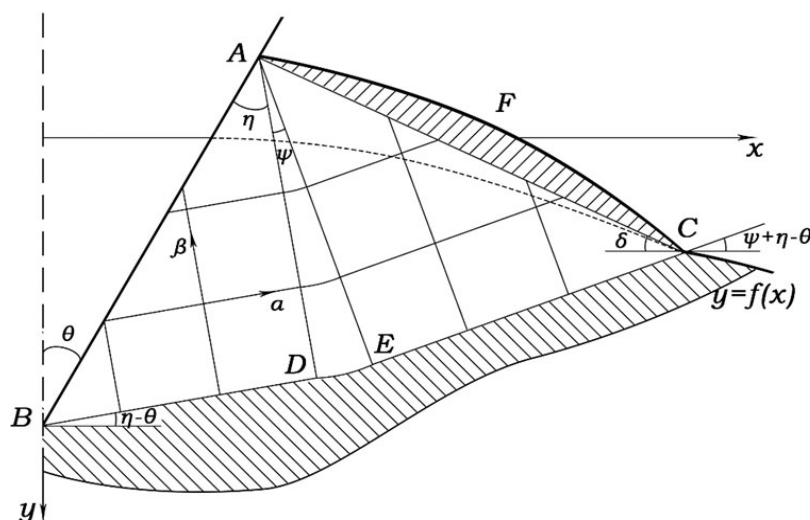


Рис. 1. Поле линий скольжения при вдавливании клина с углом раствора 2θ в выпуклую заготовку

Скорость внедрения клина V_y постоянна и полагается равной -1 , т. к. ось y направлена вверх, коэффициент трения μ постоянен вдоль поверхности контакта клина с заготовкой. Его значение связано с углом η зависимостью [1]

$$\mu = \frac{\cos 2\eta}{1 + \sin 2\eta}.$$

Решение задачи состоит в определении в каждый момент времени t формы деформированной границы материала AFC , координат точек A и C , угла раскрытия веера $\psi(t)$. Известные значения перечисленных параметров позволяют найти необходимую для внедрения клина нагрузку.

Алгоритм решения задачи. В каждый момент времени поле скоростей определяется проекциями скорости V_y на α - и β -линии, которые равны [2-4]

$$v_{\alpha} = -V_y \frac{\sin \theta}{\cos \eta}, \quad v_{\beta} = 0.$$

Из полученного поля скоростей следует, что движение материала в области $BAFC$ происходит по направлению α -линий, при этом области ABD и $AECF$ движутся как жёсткое целое, а угол раствора веера в силу выпуклости заготовки монотонно уменьшается. Из этого следует, что весь процесс деформирования можно разбить на два этапа: первый происходит при $\psi > 0$, деформированная поверхность в процессе пластического течения образуется в точке C , а в точке A она подминается клином; второй начинается в момент времени t^* при обращении угла ψ в нуль, деформированная поверхность также образуется в точке C , но в точке A она уже не подминается клином и, соответственно, не оказывает влияния на пластическое течение.

На первом этапе материал в области $AECF$ движется как жёсткое целое, проекции скорости точек области на оси координат x и y равны [5]

$$v_x = v_{\alpha} \cos(\eta - \theta + \psi), \quad v_y = v_{\alpha} \sin(\eta - \theta + \psi). \quad (1)$$

Интегрирование соотношений (1) даёт уравнения свободной границы деформированной поверхности AFC в виде

$$\begin{aligned} x(t, \tau) &= v_{\alpha} \int_{\tau}^t \cos(\eta - \theta + \psi) dt + x_0(\tau), \\ y(t, \tau) &= v_{\alpha} \int_{\tau}^t \sin(\eta - \theta + \psi) dt + y_0(\tau), \end{aligned}$$

где $x = x_0(\tau)$, $y = y_0(\tau)$ – параметрическое представление границы тела до деформации; $x = x(t, \tau)$, $y = y(t, \tau)$ – параметрические уравнения деформированной части свободной поверхности AFC в момент времени t . Параметр τ выбран так [6], что он совпадает со временем перехода соответствующей точки с недеформированной границы на свободную поверхность выдавливаемого объёма, т. е.

$$x_0(\tau) = x_C(\tau), \quad y_0(\tau) = y_C(\tau).$$

В силу ортогональности треугольников ABD и AEC , а также равенства линий AD и AE между собой справедливо соотношение

$$|AC| = \sqrt{2}|AB| \cos \eta.$$

Координаты точек A и C находятся как проекции прямой AB и ломаной линии BAC на оси x и y :

$$\begin{aligned} x_A &= |AB| \sin \theta, \\ y_A &= V_y t + |AB| \cos \theta, \\ x_C &= |AB| \sin \theta + |AC| \cos \delta, \\ y_C &= V_y t + |AB| \cos \theta - |AC| \sin \delta, \end{aligned}$$

где $\delta = \frac{\pi}{4} - \eta + \theta - \psi$. Из полученных равенств можно вывести соотношение между координатами точки C :

$$\frac{x_C}{1 + \omega \cos \delta} = \frac{(y_C + t) \operatorname{tg} \theta}{1 - \omega \operatorname{tg} \theta \sin \delta}, \quad (2)$$

где $\omega = \frac{\sqrt{2}}{v_{\alpha}} = \sqrt{2} \frac{\sin \theta}{\cos \eta}$.

Так как точка C лежит на недеформированной поверхности, при форме заготовки $y = f(x)$ справедливо равенство

$$y_c(t) = f(x_c(t)). \quad (3)$$

Точка A лежит на пересечении деформированной поверхности и клина, поэтому [7–10]

$$\begin{aligned} x_A &= \frac{x_c}{1 + \omega \cos \delta} = v_\alpha \int_{\tau_A}^t \cos\left(\frac{\pi}{4} - \delta\right) dt + x_c(\tau_A), \\ y_A &= \frac{y_c + t \omega \operatorname{tg} \theta \sin \delta}{1 - \omega \operatorname{tg} \theta \sin \delta} = v_\alpha \int_{\tau_A}^t \sin\left(\frac{\pi}{4} - \delta\right) dt + y_c(\tau_A), \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_A – время начала движения материальной точки, имеющей в момент времени t координаты $x_A(t), y_A(t)$.

Соотношения (2) – (4) представляют собой систему четырёх уравнений с четырьмя неизвестными функциями: $x_c(t), y_c(t), \delta(t), \tau_A(t)$.

Дифференцированием по t эта система может быть приведена к системе дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом:

$$\begin{aligned} y'_c(t) - f'(x_c)x'_c &= 0, \\ x'_c z_1 - y'_c z_2 - \omega \psi' [x_c \sin \delta z_1^2 - (y_c + t) \cos \delta z_2^2] &= z_2, \\ x'_c z_1 - \psi' x_c z_1^2 \omega \sin \delta + \tau'_A [v_\alpha \cos(\eta - \theta + \psi(\tau_A)) - x'_c(\tau_A)] &= \\ &= v_\alpha \cos(\eta - \theta + \psi), \\ y'_c \frac{z_2}{\operatorname{tg} \theta} - \omega \cos \delta \frac{z_2}{\operatorname{tg} \theta} \psi' [t \operatorname{tg} \theta + z_2(y_c + t \omega \operatorname{tg} \theta \sin \delta)] + \\ + \tau'_A [v_\alpha \sin(\eta - \theta + \psi(\tau_A)) - y'_c(\tau_A)] &= v_\alpha \sin(\eta - \theta + \psi) - \omega \sin \delta z_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $z_1 = \frac{1}{1 + \omega \cos \delta}, z_2 = \frac{\operatorname{tg} \theta}{1 - \omega \operatorname{tg} \theta \sin \delta}$.

В момент начала процесса деформирования

$$\begin{aligned} t = 0, x_c = 0, y_c = 0, \tau_A = 0, \delta_0 &= \frac{\pi}{4} - \eta + \theta - \psi(0), \\ z_{10} &= \frac{1}{1 + \omega \cos \delta_0}, z_{20} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{1 - \omega \operatorname{tg} \theta \sin \delta_0} \end{aligned}$$

и система (5) примет вид

$$\begin{aligned} y'_c - f'(0)x'_c &= 0, \\ x'_c z_{10} - y'_c z_{20} &= z_{20}, \\ x'_c + \frac{\tau'_A}{z_{10}} \left[v_\alpha \cos\left(\frac{\pi}{4} - \delta_0\right) - x'_c \right] &= \frac{v_\alpha}{z_{10}} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \delta_0\right), \\ y'_c + \frac{\tau'_A \operatorname{tg} \theta}{z_{20}} \left[v_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{4} - \delta_0\right) - y'_c \right] &= \frac{v_\alpha \operatorname{tg} \theta}{z_{20}} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \delta_0\right) - \omega \operatorname{tg} \theta \sin \delta_0. \end{aligned}$$

Это система четырёх уравнений с тремя неизвестными – x'_c, y'_c, τ'_A . Условие совместности этой системы

$$f'(0) = \frac{z_{10} \left[\left(v_\alpha \cos\left(\frac{\pi}{4} - \delta\right) z_{10} - z_{20} \right) (z_{20} - \operatorname{tg} \theta) - z_{20} v_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{4} - \delta_0\right) \operatorname{tg} \theta (z_{10} - 1) \right]}{z_{20} \left[v_\alpha \cos\left(\frac{\pi}{4} - \delta\right) (z_{20} - \operatorname{tg} \theta) z_{10} + z_{20} \operatorname{tg} \theta \left(1 - z_{10} \left(v_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{4} - \delta_0\right) + 1 \right) + v_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{4} - \delta_0\right) \right) \right]}$$

определяет начальное значение функции $\delta(t)$. При $f'_x(0) = 0$ это условие совпадает с уравнением, связывающим углы раствора клина θ и раскрытия веера ψ в задаче о внедрении клина в полупространство:

$$\cos(2\theta - \psi_0) = \frac{\cos \psi_0}{1 + \sin \psi_0}.$$

Форма деформированной границы на этом этапе определяется функцией, являющейся решением системы (5) и имеющей вид

$$y = F(x).$$

Поскольку область $AECF$ движется как жёсткое целое, поле напряжений в этой области в рамках теории идеального жесткопластического тела не определено. Приведённое на рис. 1 поле прямолинейных характеристик определяет напряжённое состояние, которое может рассматриваться как возможное, статически допустимое продолжение поля напряжений в эту область. Оно имеет вид

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = -2k.$$

Прямая линия AC является линией разрыва напряжений, на ней выполняется условие

$$n_j \sigma_{ij} = 0,$$

а в области AFC

$$\sigma_{ij} = 0,$$

поэтому граничные условия на деформированной свободной поверхности выполняются [11].

Усилие, необходимое для внедрения клина, рассчитывается по формуле

$$p = 4k(1 + \psi)|AB| \sin \theta.$$

Схема пластического течения на втором этапе деформирования представлена на рис. 2.

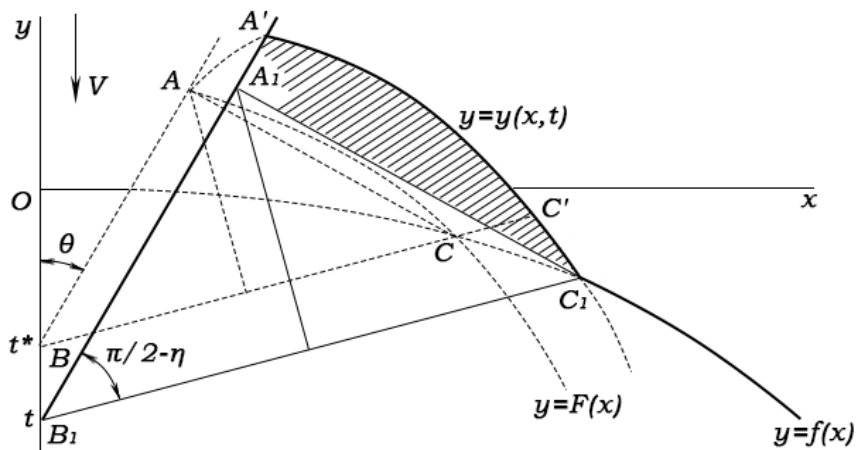


Рис. 2. Схема пластического течения при $\psi = 0$

Все точки области $A'C'C_1B_1A_1$ в каждый момент времени t ($t \geq t^*$) движутся с одной и той же скоростью v , проекции которой на оси координат равны

$$v_x = v_\alpha \cos(\eta - \theta), \quad v_y = v_\alpha \sin(\eta - \theta).$$

Уравнение подвижной границы $A'C'C_1$ определяется функцией $y = F(x)$, которая является решением системы (5) и имеет вид

$$y(x, t) = F(x - v_\alpha(t - t^*) \cos(\eta - \theta)) + v_\alpha(t - t^*) \sin(\eta - \theta).$$

На рис. 3 представлено пластическое течение в окрестности точки C . В результате вдавливания клина точка C , в момент времени t находившаяся на недеформированной поверхности, при $t + \Delta t$ займёт положение C' , а дуга CC_1 перейдёт в дугу $C'C_1$. В силу равномерного движения области $A'C'C_1B_1A_1$ по направлению α -линии

$$CC' = v_\alpha \Delta t.$$

Если рассматривать Δt как бесконечно малый промежуток времени, то дуги CC_1 и $C'C_1$ можно считать прямолинейными [12–13].

На рис. 3 выполнены дополнительные построения: отрезки CH и $C'E$ построены параллельно оси y , а отрезки C_1F и CG параллельны оси x . Из треугольников $CC'G$, FHC_1 , CFC_1 следует:

$$|C_1E| = |CC_1| \cos \phi - |CC'| \cos(\eta - \theta),$$

$$|C'E| = |CC_1| \sin \phi + |CC'| \sin(\eta - \theta),$$

$$|CC_1| = \frac{\Delta t}{\sin \phi + \cos \phi \operatorname{tg}(\eta - \theta)}.$$

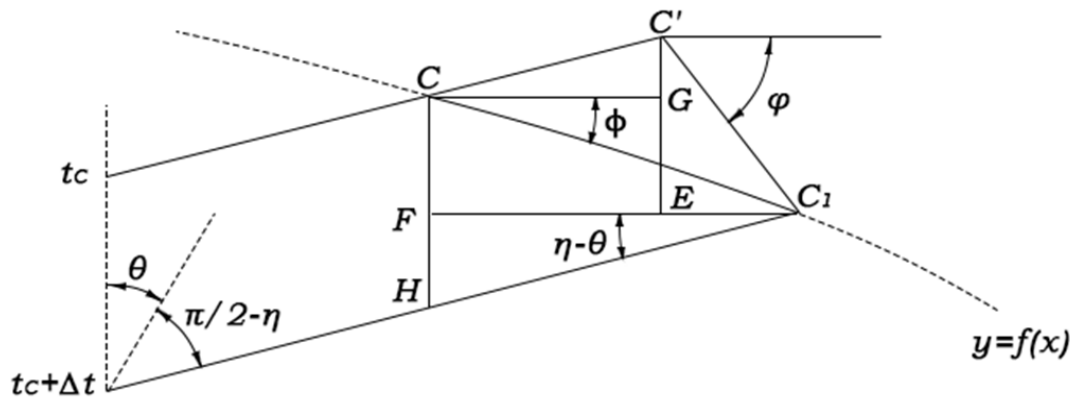


Рис. 3. Пластическое течение в окрестности точки C

В силу того, что $v_\alpha \Delta t = \operatorname{tg} \phi$,

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{1 + v_\alpha \sin(\eta - \theta) [1 + \operatorname{tg}(\eta - \theta) \operatorname{ctg} \phi]}{\operatorname{ctg} \phi - v_\alpha \cos(\eta - \theta) - v_\alpha \sin(\eta - \theta) \operatorname{ctg} \phi}. \quad (6)$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ хорда CC_1 станет касательной к недеформированной поверхности $y = f(x)$ в точке C , а хорда $C'C_1$ – касательной к деформированной поверхности $y = y(x, t)$ в той же точке C , поэтому

$$\operatorname{tg} \phi = -f'(x_c), \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \phi = -\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{(x,t)=(x_c,t_c)} = -F'(x_c), \quad (8)$$

где t_c – время начала движения точки C .

Положение точки C определяется пересечением недеформированной поверхности $y = f(x)$ с линией

$$y = x \operatorname{tg}(\eta - \theta) + V_y t_c,$$

откуда следует равенство

$$x_c \operatorname{tg}(\eta - \theta) - t_c = f(x_c). \quad (9)$$

Введение новой переменной

$$\tilde{x} = x_c - v_\alpha(t - t_c) \cos(\eta - \theta) \quad (10)$$

и подстановка (7) и (8) в (6) приводят к уравнению

$$F'(\tilde{x}) = \frac{f'(x_c) - v_\alpha \sin(\eta - \theta) [\operatorname{tg}(\eta - \theta) - f'(x_c)]}{v_\alpha \sin(\eta - \theta) - v_\alpha \cos(\eta - \theta) f'(x_c) - 1}. \quad (11)$$

Система уравнений (9) – (11) при условии $F(x_c) = y_c$ определяет ниже точки C некоторую проходящую через эту точку кривую $y = F(x)$, которая, перемещаясь вдоль линии скольжения со скоростью v_α , образует деформированную границу на втором этапе деформирования. Выполненная замена переменных эквивалентна обратному перемещению деформированной границы из положения $A'C'$, которое она занимала в момент времени t (см. рис. 2) в положение AC , занимаемое ею в момент времени t^* .

При $\psi = 0$ процесс деформирования происходит только вдоль линии разрыва скоростей B_1C_1 и вся область $B_1A_1A'C_1$ движется как жёсткое целое [14–15]. В качестве возможного статически допустимого продолжения поля напряжений в эту область можно рассматривать однородное напряжённое состояние

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = -2k.$$

Так как материал в области $A_1A'C_1$ свободен от напряжений и не оказывает давления на клин, то при расчёте усилия, необходимого для внедрения клина, учитывается только часть площади контакта B_1A_1 :

$$p = 4k|A_1B_1| \sin \theta,$$

Рассмотренное решение задачи о внедрении клина в выпуклую заготовку имеет место при условии

$$\eta \geq \theta$$

и будет полным, если существует статически допустимое продолжение поля напряжений ниже линии $BDEC$.

Пусть абсолютно твёрдый клин $y = |x| \operatorname{ctg}(\theta)$ внедряется в заготовку, имеющую форму гиперболического цилиндра $\frac{(y-a)^2}{a^2} - \frac{x^2}{b^2} = 1$. Для данной задачи возможны три варианта пластического течения.

В случае отсутствия трения в течение всего процесса деформирования угол раскрытия веера $\psi(t)$ будет сохранять постоянное ненулевое значение. Вследствие наличия у гиперболы асимптот $y = \pm \frac{a}{b}x$ процесс будет стремиться к некоторому автомодельному режиму, соответствующему вдавливанию клина $y = |x| \operatorname{ctg}(\theta)$ в клин $y = \frac{a}{b}|x|$. Форма подвижной границы в этом случае находится из решения системы уравнений (5).

Второй случай имеет место, если выполняется условие

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \eta + \theta\right) \geq \frac{a}{b}.$$

В данном случае при малых глубинах внедрения клина течение происходит при ненулевом ψ . Форма подвижной границы определяется решением системы (5). При дальнейшем внедрении клина угол раскрытия веера обращается в нуль и процесс деформирования стремится к автомодельному режиму. Форма деформированной границы определяется из решения системы (9) – (11).

Третий случай имеет место при

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \eta + \theta\right) < \frac{a}{b}.$$

Тогда решение может быть построено только до момента, когда прямая линия AC займёт положение касательной к гиперболе в точке C . Для данной схемы это предельное положение линии AC ,

позволяющее построить статически допустимое продолжение поля напряжений в жёсткую область.

Пусть гиперболический цилиндр задаётся уравнением

$$(y - 1)^2 - \frac{x^2}{16} = 1,$$

угол раствора клина равен $\frac{\pi}{4}$, трение отсутствует, т. е. $\eta = \frac{\pi}{4}$.

Тогда уравнение (3) примет вид

$$y_c = 1 - \frac{1}{4}\sqrt{x_c^2 + 16}.$$

Уравнение (2) после исключения из него y_c запишется в виде

$$x_c(t) = \frac{(t+1)\frac{z_1}{z_2} - \frac{1}{4}\sqrt{16\left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 + t^2 + 2t}}{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 - \frac{1}{16}}.$$

Форма деформированной границы материала определяется решением системы (5), которая для данной задачи примет вид

$$y'_c(t) = -\frac{x_c}{4\sqrt{x_c^2 + 16}}x'_c,$$

$$x'_c z_1 - y'_c z_2 = z_2,$$

$$x'_{CZ_1} + \tau'_A[v_\alpha \cos(\psi) - x'_C(\tau_A)] = v_\alpha \cos(\psi),$$

$$y'_c \frac{z_2}{\tan \theta} + \tau'_A [v_\alpha \sin(\psi) - y'_c(\tau_A)] = v_\alpha \sin(\psi) - \omega \sin \delta z_2.$$

Геометрическое представление пластической области и деформированной поверхности материала дано на рис. 4 [16].

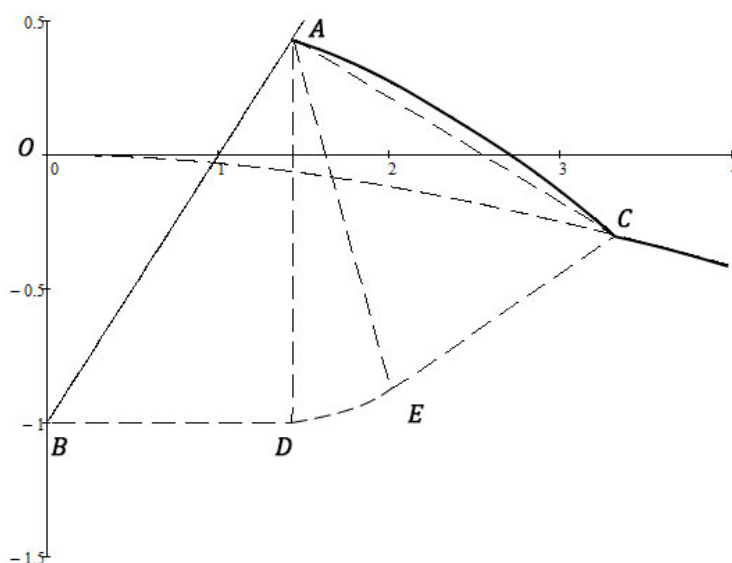


Рис. 4. Пластическая область и деформированная поверхность в задаче о внедрении клина $y = |x| \operatorname{ctg}(\frac{\pi}{6})$ в гиперболический цилиндр $(y - 1)^2 - \frac{x^2}{16} = 1$

В силу отсутствия трения решение задачи стремится к автомодельному режиму. Подобие формы деформированной поверхности для моментов времени $t = 1, t = 2, t = 3$ представлено на рис. 5.

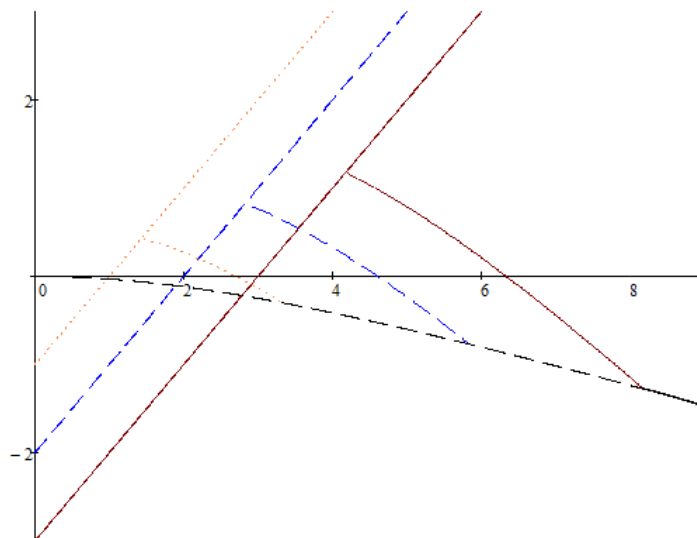


Рис. 5. Подобие формы деформированной поверхности в задаче о вдавливании клина $y = |x|\operatorname{ctg}(\frac{\pi}{6})$ в гиперболический цилиндр $(y - 1)^2 - \frac{x^2}{16} = 1$ при отсутствии трения

Выводы. В данной работе для задачи о внедрении клина в выпуклую заготовку были выведены соотношения, позволяющие определить в каждый момент времени t : форму деформированной границы материала; координаты точек, лежащих на пересечении деформированной поверхности и клина, деформированной и недеформированной поверхностей; угол раскрытия веера $\psi(t)$ [17–18]. Получено соотношение для определения по найденным значениям перечисленных величин необходимой для внедрения клина нагрузки. Также было получено решение задачи о внедрении клина $y = |x|\operatorname{ctg}(\theta)$ в гиперболический цилиндр $\frac{(y-a)^2}{a^2} - \frac{x^2}{b^2} = 1$, вычисленное при отсутствии трения для значений $\theta = \frac{\pi}{4}$, $a = 1$, $b = 4$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быковцев, Г. И. Теория пластичности / Г. И. Быковцев, Д. Д. Ивлев. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 528 с.
2. Хромов, А. И. Деформация и разрушение жесткопластических тел / А. И. Хромов. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.
3. Амосов, О. С. Создание интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы безопасности вуза нового поколения: о новом проекте Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета / О. С. Амосов, С. Г. Баена, Я. С. Иващенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № I-1 (29). – С. 119-120.
4. Амосов, О. С. Сетевая классификация атак в задачах информационной безопасности на основе интеллектуальных технологий, фрактального и вейвлет-анализа / О. С. Амосов, Д. С. Магола, С. Г. Баена // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № IV-1 (32). – С. 19-29.
5. Моделирование деформационных процессов элементов сложных конструкций в условиях малоциклового деформации / А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев, А. И. Хромов, И. В. Канахин // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 123-128.



6. Хромов, А. И. Поверхность нагружения, связанная с линиями уровня поверхности деформаций несжимаемого жёсткопластического тела / А. И. Хромов, Е. П. Кочеров, А. Л. Григорьева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2006. – № 43. – С. 88-91.
7. Григорьева, А. Л. Алгоритм решения задачи о растяжении полосы с непрерывным полем скоростей перемещений с использованием деформационно-энергетического условия пластичности / А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1-3. – С. 694-700.
8. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: Гостехиздат, 1956. – 407 с.
9. Разработка модели определения глубины пространства для задач детектирования препятствий беспилотного летательного аппарата / Р. И. Шишов, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева, Е. П. Жарикова // Современные наукоёмкие технологии. – 2019. – № 11-2. – С. 306-313.
10. Детектирование состояния поверхности / Е. П. Жарикова, И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 58-63.
11. Намоконов, А. Н. Разработка программного комплекса получения параметров, характеризующих поведение быстрохватывающихся бетонов высокопрочных марок / А. Н. Намоконов, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. В 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – С. 330-333.
12. Атюков, Н. В. Математическое моделирование образа объекта с помощью лазерного дальномера / Н. В. Атюков, А. Л. Григорьева // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, 9-20 апреля 2018 г., г. Комсомольск-на-Амуре. В 2 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – С. 129-131.
13. Володченко, В. С. Поля деформаций тензора конечных деформаций в окрестности угловой точки штампа / В. С. Володченко, О. В. Козлова // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / отв. ред. Э. А. Дмитриев. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2017. – С. 230-232.
14. Bukhanko A. A., Kozlova O. V. Strain Field and Energy Dissipation at a Crack Tip under Axisymmetric Strain Conditions // Materials Physics and Mechanics. 2016. Vol. 28. № 1-2. P. 36-38.
15. Сухарев, А. Г. Методы оптимизации / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – М.: Юрайт, 2014. – 368 с.
16. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов: учеб. пособие / Н. В. Голубева. – СПб.: Лань, 2013. – 192 с.
17. Тимченко, Т. Н. Системный анализ в управлении / Т. Н. Тимченко. – М.: РИОР, 2011. – 162 с.
18. Zemlyanova A. Y., White L. M. Axisymmetric frictionless indentation of a rigid stamp into a semi-space with a surface energetic boundary // Mathematics and Mechanics of Solids. 2021.

3 января 2025 г. ушёл из жизни замечательный человек, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, наставник и руководитель многих молодых учёных Хромов Александр Игоревич, который являлся одним из ведущих учёных России в теории пластичности.

Хромов Александр Игоревич родился 15 марта 1949 г. в г. Куйбышеве в семье служащих. Окончил в 1972 г. Куйбышевский авиационный институт и в 1977 г. Воронежский государственный университет. С марта 1972 г. по апрель 1974 г. работал на Куйбышевском моторном заводе. С мая 1974 г. по октябрь 1975 г. работал инженером-конструктором-расчётчиком в Куйбышевском конструкторском бюро автоматических систем. С октября 1975 г. по октябрь 1987 г. работал в Куйбышевском авиационном институте с перерывом на обучение в очной аспирантуре при Куйбышевском государственном университете.



Защитил кандидатскую диссертацию в 1981 г. по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела (физико-математические науки) под руководством доктора физико-математических наук профессора Г. И. Быковцева. В октябре 1987 г. переведён в Тихоокеанский океанологический институт ДВНЦ РАН на должность старшего научного сотрудника. С июля 1988 г. работал в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН заведующим лабораторией механики деформируемого твёрдого тела. Защитил докторскую диссертацию в 1992 г. в Чебоксарском государственном педагогическом институте им. И. Я. Яковлева при консультировании доктора физико-математических наук профессора Г. И. Быковцева по специальности 01.02.04. – Механика деформируемого твёрдого тела (физико-математические науки). С октября 1992 по 2006 гг. работал заместителем директора по научной работе в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН. В 1993 г. получил научное звание профессора. В 2005 г. награждён почётным званием «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». С 2006 по 2013 гг. – профессор кафедры космического машиностроения Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. С 2013 по 2025 гг. профессор кафедры прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

Александр Игоревич являлся первым заведующим и основателем кафедры «Прикладная математика и информатика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета с 1993 по 2006 гг., и с 2013 по 2025 гг. работал профессором кафедры «Прикладная математика».

Им был сделан крупный вклад в развитие теории пластичности. Основным направлением его исследований являлась теория деформирования и разрушения жесткопластических тел с учётом изменения их геометрии. Предложенный им подход позволил свести решение определённого класса технологических задач теории пластичности к интегрированию систем обыкновенных дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. Получен ряд точных решений задач о внедрении плоских, клинообразных и криволинейных штампов в тела произвольной формы, задач о деформировании тел сложной формы с поверхностями разрывов скоростей.

Его труды являются учебными пособиями для многих молодых учёных в области механики деформируемого твёрдого тела. Им было опубликовано более 110 научных работ, в том числе в ведущих журналах России. Он являлся членом редакционных коллегий многих ведущих Российских журналов, входил в Российский Национальный комитет по теоретической и прикладной механике (ранее: Национальный комитет СССР), его труды неоднократно докладывались как на российских, так и на международных конференциях (Греция, Франция, Германия и т. д.).



В течение многих лет Александр Игоревич был членом нескольких диссертационных советов по защите докторских и кандидатских диссертаций, под его руководством было защищено 10 кандидатов наук и 2 доктора физико-математических наук.

За время преподавательской деятельности в КНАГУ он подготовил и прочитал ряд курсов, которые впервые преподавались в вузе («Механика деформируемого твёрдого тела», «Тензорный анализ»).

Александр Игоревич являлся замечательным коллегой и руководителем, никогда не отказывал в помощи и всегда давал правильные советы. С пониманием относился как к коллегам, так и к ученикам.

Он является ярким примером настоящего российского учёного, который всего себя посвятил науке, а также мудрым и справедливым человеком. Он внёс большой вклад в развитие механики деформируемого твёрдого тела и помог в становлении личности многим молодым ученикам. Весь коллектив вуза скорбит и соболезнует близким в утрате такого замечательного человека.

Редакция и редсовет журнала присоединяются к соболезнованиям, выраженным родным, коллегам и друзьям Александра Игоревича.

Content

Научное издание

CONTROL

S. P. Cherniy, K. A. Emelianov, M. A. Lyamin, D. Yu. Oblogin SIMULATION OF A MULTI-STAGE FUZZY CONTROLLER FOR CONTROLLING A MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE SYSTEM	4
--	---

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

I. K. Andrianov, D. O. Frolov METHOD FOR DETERMINING THE MOST THERMALLY LOADED AREA ON THE SURFACE OF A GAS TURBINE ENGINE BLADE USING A NEURAL NETWORK	11
Ya. Yu. Grigoriev, I. N. Alkhimenko USING MACHINE LEARNING FOR THE TASK OF PREDICTING CHANGES IN THE COASTLINE OF THE AMUR RIVER	16
D. A. Tukmakov NUMERICAL MODELING OF MONODISPERSE AEROSOL VIBRATIONS IN AN ACOUSTIC RESONATOR WITH DIFFERENT DISPERSE PHASE PARAMETERS	24
S. G. Yermakov, A. V. Zabrodin, M. A. Kostin APPLICATION OF THE DYNAMIC BLOOM FILTER FOR PROCESSING BIG DATA IN REAL-TIME SYSTEMS	32
S. I. Noskov, S. V. Belyaev ANTI-ROBUST ESTIMATION OF CLUSTER LINEAR REGRESSION PARAMETERS	41
T. L. Dmitrieva, A. E. Botkhoev, D. O. Frolov SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS OF ROD STRUCTURES USING THE TOOLS OF THE MATHCAD COMPUTING SYSTEM	46
E. P. Ivankova, M. B. Kolesnik INVESTIGATION OF AN ELECTROMECHANICAL RECIPROCATING MOTION DRIVE IN A SIMULATION PACKAGE	54
A. V. Frolov, A. N. Shvets, Y. F. Musihin APPLICATION OF MODIFIED SIGMA-DELTA MODULATOR FOR DIGITAL SIGNALS FREQUENCY DIVISION	63
A. D. Chernyshov, V. V. Goryainov STRESSES IN A RECTANGULAR MEMBRANE FIXED IN AN INCLINED PLANE UNDER ALTERNATING LOAD	68

MACHINERY

O. E. Sysoev, S. B. Maryin, E. O. Sysoev PREDICTION OF THE RESISTANCE PERIOD OF END MILLS WHEN PROCESSING HIGH-HARD MATERIALS	72
V. S. Shchetinin, A. A. Kosmynin DEPENDENCE OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF SPINDLE ASSEMBLIES ON THE POROSITY FRACTION OF THEIR PARTIALLY POROUS GAS-STATIC BEARINGS	76
E. H. Ri, A. A. Prikhodko, S. V. Dorofeev, A. R. Voynov, S. S. Cheshev DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPLEX-SHAPED CASTING CORES USING ADDITIVE METHODS FOR THE AVIATION INDUSTRY	79
S. V. Dorofeev, A. R. Voynov, A. V. Shchekin, M. I. Borets, M. A. Ermakov COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE IMPACT OF FOUNDRY CORE MANUFACTURING TECHNOLOGY ON THEIR PHYSICAL, MECHANICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS AND QUALITY OF CASTINGS	93
B. Ya. Mokritskii, A. V. Kosmynin, A. A. Skripilev, O. E. Sysoev AREAS OF RATIONAL USE OF PREFABRICATED MILLING CUTTERS FROM DIFFERENT MANUFACTURERS FOR PROCESSING BLANKS OF PARTS WITH A HIGH-HARDNESS LAYER	107

MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGY

I. V. Belova IDENTIFICATION OF THE CAUSES OF DESTRUCTION OF THE HYDRAULIC CYLINDER LINER	112
---	-----

MATHEMATICS AND MECHANICS

Ya. Yu. Grigoriev, A. L. Grigorieva, I. V. Kanashin MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF PRESSING A WEDGE INTO A CONVEX WORKPIECE	117
--	-----

SCIENTIFIC LIFE

TO THE MEMORY OF ALEXANDER IGOREVICH KHROMOV	127
--	-----

Учёные записки КНАГТУ
2025 № III (83)
Науки о природе
и технике

Выпускающий редактор
Е. П. Иванкова

Подписано в печать 27.06.2025
Дата выхода в свет 30.06.2025

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 15,11.
Уч.-изд. л. 17,28.
Тираж 200. Заказ 31324

Отпечатано:
в типографии КНАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27;
в типографии «Агора»
681024,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 39.

