

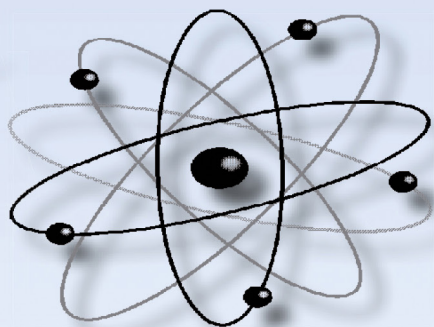
Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ V (93)

2026

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.

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

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-38212 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 «Учѐные 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, пр. Ленина, д. 27

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:	Сергей Петрович Черный , доктор технических наук, доцент. E-mail: kepapu@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. E-mail: journal@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Ответственный секретарь:	Алина Валерьевна Бузикаева , кандидат технических наук. E-mail: kepapu@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:	Никита Станиславович Шушарин . E-mail: web_dev@knastu.ru

Серия: «Науки о природе и технике»

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: maryinsb@mail.ru
2. Электротехнические комплексы и системы (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 в технических системах (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	Вячеслав Алексеевич Соловьев , доктор технических наук, профессор. E-mail: kepapu@knastu.ru Сергей Петрович Черный , доктор технических наук, доцент. E-mail: kepapu@knastu.ru Андрей Юрьевич Торгашов , доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacc.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)	Валерий Иванович Одинокоев , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: osnid@knastu.ru Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru Константин Сергеевич Бормотин , доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@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: 013696@togudv.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор. E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (1.1.8 - Механика деформируемого твёрдого тела)	Анатолий Александрович Буренин , доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacc.dvo.ru Олег Евгеньевич Сысоев , доктор технических наук, профессор. E-mail: sia@knastu.ru

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:	
1. Культурология и искусствоведение (1.10.1 - Теория и история культуры, искусства)	Яна Станиславовна Крыжановская , доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowsckaia.yana2012@yandex.ru Евгения Валерьевна Савелова , доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. E-mail: savelova_ev@hgiik.ru Виктория Юрьевна Прокофьева , доктор филологических наук, профессор. E-mail: nikars1999@mail.ru Илья Игоревич Докучаев , доктор философских наук, профессор. E-mail: i.dokuchaev@spbu.ru
2. Психология и педагогика (5.8.1 - Общая педагогика, история педагогики и образования)	Булашенко Олег Анатольевич , доктор педагогических наук, доцент. E-mail: college@knastu.ru Екатерина Иосифовна Артамонова , доктор педагогических наук, профессор. E-mail: manpo@yandex.ru
3. История (5.6.1 - Отечественная история, 5.6.2 - Всеобщая история)	Жанна Валерьяновна Петрунина , доктор исторических наук, профессор. E-mail: petrunina71@bk.ru Федирко Оксана Петровна , доктор исторических наук, профессор. E-mail: fedenka.67@mail.ru

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

Содержание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Макашева С. И., Пинчуков П. С.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ВЫСШИМ
ГАРМОНИЧЕСКИМ СОСТАВЛЯЮЩИМ ТОКА НА УЧАСТКЕ ТРАНЗИТА 220 КВ 4

Фокин Д. С., Гуляев А. В., Тен Е. Е.

ОЦЕНКА ДОСТАТОЧНОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРИЧИННОСТИ
В СУДЕБНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЕ 15

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Черный С. П., Шушарин Н. С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СРЕДЫ И ДИНАМИКИ ПОДВОДНОГО
АППАРАТА ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ 25

Ворощенко В. Д., Биткина А. А., Иванкова Е. П.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВНУТРИЗАВОДСКОЙ
ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ 34

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Ким К. К., Карпова И. М., Смирнов В. А., Иванов С. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ,
РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ЛОПАСТЯХ ВЕТРОГЕЛИОГЕНЕРАТОРА.....44

Евстигнеев А. И., Колошенко Ю. Б., Бахматов П. В.

СХОДИМОСТЬ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВЛИЯНИИ
КОЛЬЦЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЫТОЧЕК НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ.....54

Хасаншин С. Д., Григорьева А. Л., Лазутина В. Р.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ВЕТРА
И ГРАДИЕНТА СДВИГА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ 59

Носков С. И., Серёдкин С. П.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ
КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ СВЁРТКИ ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ С ЛИНЕЙНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ 66

Гренкин Г. В., Галимзянова К. Н.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ
ИЗМЕРЕНИЯМ В РАМКАХ МОДЕЛИ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА.....74

Трещев И. А., Малаховец А. И., Монастырская Е. И.

О ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ СОБЫТИЙНОЙ МОДЕЛИ
СЦЕНАРИЕВ АТАК ЗЛОУМЫШЛЕННИКОВ 81

Хряпченко К. Д., Григорьева А. Л., Болотский А. С.

ИНТЕГРАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ В ЖЁСТКОПЛАСТИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ
С РАЗРЫВНЫМИ ПОЛЯМИ СКОРОСТЕЙ 91

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА СБОРНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ 99

Мокрицкий Б. Я.

О ПРИМЕНЕНИИ ПОКРЫТИЙ НА ФРЕЗАХ ПРИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ
ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 105

Ваниев Э. Р., Скакун В. В., Джемилов Э. Ш., Джемалидинов Р. М., Алиев А. И., Башкова Т. И.

ВЛИЯНИЕ ПРИРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ ДИСКОВЫХ ФРЕЗ И ШЕРОХОВАТОСТЬ
ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ
БЕЗОПАСНЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ 109

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Старцев Е. А., Бахматов П. В.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СОСТАВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО
МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА,
ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА.....120

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ
ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

Макашева С. И., Пинчуков П. С.
S. I. Makasheva, P. S. Pinchukov

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ВЫСШИМ ГАРМОНИЧЕСКИМ СОСТАВЛЯЮЩИМ ТОКА НА УЧАСТКЕ ТРАНЗИТА 220 кВ

ASSESSMENT OF POWER QUALITY BASED ON HIGHER HARMONIC CURRENT COMPONENTS IN A 220 KV TRANSIT SECTION

Макашева Светлана Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: smakasheva@gmail.com.

Svetlana I. Makasheva – PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: smakasheva@gmail.com.

Пинчуков Павел Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: pinchukov-pavel@mail.ru.

Pavel S. Pinchukov – PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: pinchukov-pavel@mail.ru.

Аннотация. Работа посвящена проблеме низкого качества электрической энергии высоковольтных линий электропередач. Целью работы является количественная оценка степени искажения кривых тока, что служит отправной точкой для расчёта и выбора параметров средств повышения качества электрической энергии и компенсации реактивной мощности и востребовано как потребителями электрической энергии, так и электросетевыми организациями. Предметом исследования является гармонический состав тока на шинах понизительных подстанций 220 кВ магистральной электрической сети. Выполнен анализ современных отечественных и зарубежных стандартов в отношении гармонических искажений тока и напряжения, на основании которого показаны ключевые различия. Выполнен анализ отечественных и зарубежных нормативных документов по качеству тока, в результате чего дана оценка степени соответствия коэффициентов искажений кривых тока регламенту IEEE 519-2022, что выявило существенное отличие измеренных и рассчитанных значений исследуемых показателей качества тока от их регламентированных значений. Качество тока на участке транзита электрической энергии признано неудовлетворительным для двух подстанций как по отдельным гармоническим составляющим, так и по суммарному коэффициенту искажений кривой тока, что не позволяет использовать количественные значения показателей, регламентируемых IEEE 519-2022, в качестве основы для разработки отечественных норм гармонических искажений тока без учёта специфики работы и состояния отечественных электрических сетей и систем.

Summary. This work addresses the problem of poor power quality in high-voltage transmission lines. The aim of the study is to quantitatively assess the degree of current waveform distortion, which serves as a starting point for calculating and selecting the parameters of power quality improvement devices and reactive power compensation equipment - a task that is of practical interest to both electricity consumers and grid operators. The subject of the research is the harmonic composition of current on the 220 kV buses of step-down substations in the main electric power grid. An analysis of current Russian and international standards concerning current and voltage harmonic distortions has been performed, highlighting the key differences between them. A review of domestic and foreign regulatory documents on current quality has been carried out, based on which an assessment has been made of how well the measured current distortion coefficients comply with the IEEE 519-2022 standard. This comparison revealed significant discrepancies between the measured and calculated values of the power quality indicators under study and their prescribed limits. The current quality in the 220 kV transit section has been found to be unsatisfactory for two substations, in terms of both individual harmonic components and the total harmonic distortion (THD) of the current waveform. Consequently, the quantitative limit values specified in IEEE 519-2022 cannot be used as a basis for developing Russian national standards for current harmonic distortions without taking into account the specific operating conditions and the current state of Russian electric power networks and systems.

Ключевые слова: система электроснабжения, качество электрической энергии, высшие гармонические составляющие, показатель качества электрической энергии, суммарный коэффициент искажения кривой тока.

Key words: power supply system, power quality, higher harmonic components, power quality indices, total harmonic distortion of current.

УДК 621.311-021.456

Введение. Развитие электроэнергетической отрасли является стратегически важным драйвером экономического роста и неразрывно связано с повышением качества жизни современного человека, а высокое качество электрической энергии (КЭ) в сложном и многоэтапном процессе её производства, передачи, распределения и потребления является важным залогом надёжной и безаварийной работы оборудования, что объясняет стремительно растущее внимание к вопросам КЭ в мировом сообществе и в нашей стране с середины 90-х годов XX века [1–4].

В работе В. Ф. Белей и К. В. Коротких [5] приводятся результаты экспериментальных исследований мощных нелинейных электроприёмников (пригородной железной дороги и дуговой сталеплавильной печи), которые демонстрируют негативное влияние низкого КЭ на эффективность работы систем электроснабжения и свидетельствуют о необходимости контроля высших гармонических составляющих (ВГС) тока.

В исследовании Н. И. Старинского, А. В. Гуляева и Д. С. Фокина [6] рассмотрены проблемы ухудшения КЭ при работе современных регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями, проявляющиеся в виде искажения формы питающего напряжения, что вызывает формирование несинусоидальных токов с последующей их пульсацией, негативно влияя на производительность двигателей, вызывая потери энергии и ухудшение перегрузочной способности оборудования, а также предложены мероприятия по решению описанных проблем.

В статье А. Б. Васенина, С. Е. Степанова, Е. С. Подшивалова, О. В. Крюкова [7] рассмотрены промышленные системы электроснабжения и основные источники искажения формы кривых тока, а также дан анализ создаваемых ими гармонических спектров. Авторы рассматривают основные особенности отечественных и международных стандартов по нормированию показателей качества электрической энергии (ПКЭ), что также является объектом внимания работ С. И. Макашевой, П. С. Пинчукова [1; 2].

Публикация Н. Н. Долгих, Д. С. Осипова, А. О. Шепелева, Е. Ю. Шепелевой [8] приводит результаты имитационного моделирования для исследования несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системе электроснабжения с электроприёмниками, обладающими нелинейной вольтамперной характеристикой, и даёт количественную оценку потерям активной мощности, которые обусловлены наличием высших гармонических составляющих тока и напряжения. Необходимость системного анализа влияния КЭ на функционирование систем бесконтактного мониторинга линий электропередач подчёркивают А. М. Брамм, А. И. Хальясмаа, С. Ф. Сарапулов, В. П. Метельков в своей работе [9], количественно оценивая скорость реакции устройств защиты линий в зависимости от коэффициентов нелинейных искажений токов и напряжений.

Таким образом, произведённый литературный анализ подтверждает актуальность задачи обеспечения надлежащего КЭ в системах электроснабжения путём оптимизации нормативной её составляющей, включая стандартизацию и мониторинг ПКЭ.

Нормативная составляющая вопросов КЭ. Несмотря на общность подходов к стандартизации КЭ, главным отличием отечественной нормативной базы от зарубежной является отсутствие в ней ПКЭ и норм по качеству тока для высоковольтных систем передачи и распределения электрической энергии (ЭЭ), необходимость мониторинга и нормирования которого неоднократно подчёркивалась в работах российских исследователей [1; 2; 5–7].

Так, в настоящее время в нашей стране действует ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009) «Общее руководство по средствам измерений и измерения гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств», однако нормирование гармонического состава тока предусматривается только для низковольтных распределительных систем электроснабжения в зависимости от величины потребляемого техническим средством тока согласно следующим нормативным документам:



- ГОСТ 30804.3.12-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний»;

- ГОСТ 30804.3.2-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний».

Один из последних вступивших в силу нормативных документов по КЭ – Приказ Министерства энергетики РФ от 28 августа 2023 г. № 690 «Об утверждении требований к качеству электрической энергии, в том числе распределению обязанностей по его обеспечению между субъектами электроэнергетики и потребителями электрической энергии» [10] – устанавливает перечень регламентируемых ПКЭ по частоте и напряжению, не рассматривая при этом качество тока.

Характерно, что указанные в [10] требования к КЭ относятся к точкам присоединения энергопринимающих установок потребителей ЭЭ к электрической сети и не относятся к точкам контроля КЭ высоковольтных электросетевых объектов Единой энергетической системы (ЕЭС) России. Таким образом, для шин высокого напряжения трансформаторных подстанций (ПС), осуществляющих транзит электрической энергии, отечественные стандарты по нормированию качества тока в настоящее время отсутствуют, что затрудняет нормализацию работ по его повышению.

Негативное влияние ВГС тока на работу элементов систем электроснабжения является существенным фактором снижения эффективности работы системы в целом и нуждается в разработке и выборе параметров настройки средств повышения КЭ, для чего необходимо иметь данные о количественных значениях ВГС тока. Например, для минимизации определённых ВГС напряжения в условиях эксплуатации высоковольтных электрических сетей применяются разнообразные компенсирующие устройства, поэтому их установке предшествуют комплексные инженерные расчёты, включающие в себя выбор типа фильтр-компенсирующих устройств, определение мест их размещения в конкретных точках сети, расчёт и выбор параметров их настройки. При проведении подобных расчётов необходимы количественные данные о частоте и амплитуде определённых ВГС тока, что делает задачи определения гармонического состава тока, его мониторинга и контроля актуальными и востребованными на практике в условиях эксплуатации высоковольтных электрических сетей, в том числе и на участках транзита электрической энергии.

Применение зарубежных стандартов в условиях отсутствия отечественной нормативной документации даёт возможность исследователям провести необходимые изыскания, как было показано в работе [11] при оценке воздействия магнитной бури на объединённую энергетическую систему центра России. Аналогичным образом, ввиду отсутствия в отечественном ГОСТ 32144-2013 требований по качеству тока для оценки гармонического состава и форм искажений электрического тока для оценки КЭ электросетевых объектов ЕЭС России авторами взят стандарт IEEE 519-2022 [12], который является наиболее значимым и регулярно обновляемым документом, где регламентированы предельные значения гармонических искажений тока и напряжения в точках общего присоединения, что объясняет его широкое применение в различных странах мира [1; 2; 5].

Методология и инструменты для анализа ВГС тока. Метрологическое обеспечение, которое применяется в отечественных системах мониторинга КЭ на реальных электросетевых объектах, включая единство требований к технологиям измерения и статистической обработке исходных данных, полностью соответствует требованиям, на которые опирается IEEE 519-2022, что открывает авторам возможность проведения количественной оценки нескольких ПКЭ по току на исследуемом участке транзита 220 кВ. Также в ходе работы необходимо ответить на вопрос: целесообразно ли в дальнейшем при разработке отечественных нормативных документов в области качества тока использовать предельные значения ПКЭ, указанные в IEEE 519-2022, или же их величины необходимо скорректировать с учётом особенностей отечественных энергообъектов, которые существенно отличаются от западных аналогов в силу ряда причин: повышенная уязвимость к несимметрии и искажениям синусоиды, вызванным разомкнутой радиально-магистральной структурой линий электропередач значительной длины; доминирование тяжёлой

промышленности и однофазного железнодорожного транспорта в структуре потребления; климатические аномалии, резко меняющие проводимость и загрузку электрической сети при экстремальных температурах и т. д.

Оценка КЭ трактуется действующим ГОСТ 32144-2013 как степень соответствия характеристик электрической энергии в конкретной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ в отношении частоты и напряжения. Регламентируются следующие параметры: ПКЭ и их количественные значения; места проведения, длительность и периодичность оценки КЭ; методика и средства измерения электрических величин и методики расчёта ПКЭ; периоды измерения и усреднения измеренных и расчётных характеристик. Относительно качества тока в ГОСТ 32144-2013 ПКЭ не представлены.

Долгое время за неимением иного в РФ применялся советский ГОСТ 23875-88, утративший силу только с 01 июля 2012 г., в котором содержалось определение коэффициента гармонических составляющих тока, широко используемое в практических расчётах: «Коэффициент гармонической составляющей тока есть величина, равная отношению действующего значения n -й гармонической составляющей тока к действующему значению основной составляющей кривой переменного тока». Численных нормируемых значений по указанному коэффициенту этот нормативный документ не содержал, тем не менее формулы для его определения широко применялись как в проектной практике, так и в процессе эксплуатации электроэнергетических объектов.

В ГОСТ 23875-88 коэффициент n -й гармонической составляющей тока $K_{I(n)i}$, %, для каждой n -й гармонической составляющей тока каждого i -го наблюдения определялся по формуле

$$K_{I(n)i} = \frac{I_{(n)i}}{I_{(1)i}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $I_{(n)i}$ – действующее значение тока n -й гармоники, А; n – порядковый номер гармоники; $I_{(1)i}$ – действующее значение тока основной частоты, А.

Адаптация положений стандарта IEEE 519-2022 для количественной оценки качества тока. Необходимо отметить, что стандарт IEEE 519-2022 ориентирован на применение в современных системах электроснабжения со смешанными и нелинейными нагрузками, которые используют разнообразные устройства инвертирования и выпрямления [12], а также системы распределённой генерации, что в целом повышает требования к высокому КЭ этих систем. Гармонические искажения тока, определяемые по выражению (1), в стандарте IEEE 519-2022 [12] отнесены к величине максимального тока нагрузки (составляющей основной частоты) в точке общего присоединения: « I_L – maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC». Таким образом, стандарт IEEE 519-2022 позволяет рассчитывать искажение гармонических составляющих тока как в процентах от максимального тока нагрузки, так и от тока основной частоты [12].

При оценке КЭ в мировой практике широко употребляется показатель Total Demand Distortion (TDD), представляющий собой суммарный коэффициент гармонических искажений тока с учётом величины нагрузки [3; 4].

Суммарный коэффициент искажений кривой тока K_I , %, отнесённый к максимальному потребляемому току, в точке контроля определяется по формуле [12]

$$K_I = \text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_n^2}}{I_L},$$

где $\sum_{i=2}^n I_n^2$ – сумма квадратов n -х гармонических составляющих тока $I_{(n)}$; I_L ($I_{\text{нагр_MAX}}$) – максимальный ток, потребляемый в точке контроля, А, принимается среднее значение токов, соответствующих пиковому потреблению в течение предыдущих 12 месяцев в контролируемой точке [12].

В проводимом исследовании будем рассчитывать TDD в процентах от тока основной частоты, поскольку это допускает стандарт [12], а база данных системы мониторинга и управления ка-



чеством электрической энергии (СМиУКЭ) позволяет рассчитать соответствующие значения суммарного коэффициента гармонических искажений тока, TDD, %:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_n^2}}{I_1}.$$

В стандарте IEEE 519-2022 нормируемые значения даны отдельно для чётных и нечётных гармонических составляющих тока, при этом ВГС разделены на 5 групп (гармоники с порядковым номером): 1) со 2-й по 10-ю, 2) с 11-й по 16-ю, 3) с 17-й по 22-ю, 4) с 23-й по 34-ю и 5) с 35-й по 50-ю – с различными ограничениями для каждой группы гармоник в зависимости от номинального напряжения и соотношения I_{SC}/I_L , где I_{SC} – максимальный ток короткого замыкания в точке общего присоединения, А [12]. В проводимых расчётах соотношение максимальных токов короткого замыкания и максимального тока, потребляемого в точке контроля I_{SC}/I_L , примем равным 200.

Пределы гармонических искажений тока в стандарте IEEE 519-2022 [12] приведены в табличной форме в зависимости от класса напряжения, порядкового номера гармоники и выделены для трёх диапазонов номинального напряжения точки контроля: 1) от 120 В до 69 кВ; 2) от 69 кВ до 161 кВ; 3) свыше 161 кВ. В нашем случае исследуемые точки контроля находятся на шинах 220 кВ трансформаторных подстанций, поэтому для анализа применим требования [9], относящиеся к третьему из указанных диапазонов. Нормируемые значения для гармоник тока представим в табл. 1, сохранив структуру и численные значения из [12], но обозначив порядковые номера гармоник тока символом « n », как это принято в нормативной литературе РФ [14].

Таблица 1

Пределы искажения тока для систем электроснабжения с номинальным напряжением выше 161 кВ

Пределы значений нечётных гармоник, % от I_1						
Пределы значений чётных гармоник составляют 25 % от нижеуказанных пределов нечётных гармоник						
I_{k3}/I_1	$2 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n \leq 50$	TDD
< 25	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
$25 < 50$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Требования стандарта IEEE 519-2022 [12] по уровням нормируемых значений гармоник тока установлены в зависимости от длительности оценки КЭ (суточной и недельной продолжительности). Суточная оценка проводится по гармоническим токам, усреднённым за короткий (3 с) период, при этом значения 99 % всех показателей по току должны быть ниже, чем значения из табл. 1, умноженные на 0,5. Недельная оценка проводится по измерениям, усреднённым за 10 мин, при этом требования распространяются на разные объёмы исследуемых данных (99 % и 95 % всех значений): 99 % всех значений показателей должны быть меньше чем в 1,5 раза значений, указанных в табл. 1; 95 % всех значений показателей должны быть меньше значений, указанных в табл. 1. Необходимо отметить, что невыполнение любого из двух условий (превышение 95 % или 99 % уровней) в ходе проверки качества тока трактуется как неудовлетворительное КЭ по конкретному ПКЭ [12]. Рассчитаем и систематизируем для дальнейшего анализа в табл. 2 нормы значений по IEEE 519-2022, указав 95 % и 99 % значения ПКЭ, применимые для периода недельной оценки.

Исходные данные для анализа ВГС тока. Для анализа КЭ по высшим гармоническим составляющим тока была взята база данных натурных замеров, выполненных автоматизированной СМиУКЭ, которой оснащены электросетевые объекты Публичного акционерного общества Единой энергетической системы (ПАО «Россети» ЕЭС России). Замеры электрических характеристик и обработка ПКЭ производились в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30-2013 для регламентированного периода контроля ПКЭ в РФ – 7 суток.

Таблица 2

Нормируемые по IEEE 519-2022 [12] значения коэффициентов гармонических составляющих тока

Значения показателей качества тока, %	95 %	99 %
Коэффициент n -й гармонической составляющей тока $K_{I(n)}$ при $n =$	2	0,75
	3	3,0
	4	0,75
	5	3,0
	6	0,75
	7	3,0
	8	0,75
	9	3,0
	10	0,75
	11	1,5
	12	0,375
	13	1,5
	14	0,375
	15	1,5
Суммарный коэффициент гармонических искажений тока K_I , (TDD), %	3,75	2,5

Количественный анализ гармонического состава тока выполнялся для двух выбранных точек контроля КЭ на шинах 220 кВ трансформаторных ПС на участке транзита электрической энергии магистральных электрических сетей, находящихся в Дальневосточном регионе РФ. Исследуемые значения параметров усреднялись за тридцатиминутный интервал и записывались в одну строку базы данных СМиУКЭ в точке контроля, при этом, помимо ПКЭ, регламентированных действующим ГОСТ 32144-2013, за время измерений в базе данных сформировалась также информация о гармоническом составе тока, что даёт возможность выполнить оценку гармонических искажений тока по методике, изложенной в стандарте IEEE 519-2022 [12].

В качестве примера на рис. 1 приведён фрагмент базы данных СМиУКЭ для одной из фаз трёхфазной электрической сети в выбранной точке контроля ПС.

В	С	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Время	Точка контроля	Kia(2),Cp днее,%	Kia(3),Cp днее,%	Kia(4),Cp днее,%	Kia(5),Cp днее,%	Kia(6),Cp днее,%	Kia(7),Cp днее,%	Kia(8),Cp днее,%	Kia(9),Cp днее,%	Kia(10),Cp еднее,%	Kia(11),Cp еднее,%	Kia(12),Cp еднее,%	Kia(13),Cp еднее,%	Kia(14),Cp еднее,%	Kia(15),Cp еднее,%
00:00	Объект	1,25	10,46	0,16	3,91	0,14	2,82	0,12	3,1	0,06	0,99	0,04	1,4	0,06	0,78
00:30	Объект	1,12	12,61	0,16	3,27	0,13	2,47	0,11	2,8	0,06	0,87	0,04	1,12	0,06	0,49
01:00	Объект	1,5	9,61	0,19	3,22	0,14	2,71	0,11	3,29	0,07	0,94	0,04	1,04	0,06	0,6
01:30	Объект	1,19	7,38	0,17	3,29	0,13	2,69	0,11	2,83	0,07	0,61	0,04	1,65	0,06	1
02:00	Объект	1,18	5,19	0,18	3,14	0,11	2,19	0,1	2,44	0,06	0,73	0,04	1,41	0,05	0,86
02:30	Объект	1,67	6,1	0,2	2,84	0,14	2,53	0,13	2,2	0,08	0,88	0,05	1,55	0,07	0,58
03:00	Объект	1,18	8,76	0,21	2,68	0,12	2,67	0,1	2,91	0,06	1,04	0,04	1,62	0,06	0,76
03:30	Объект	1,49	6,8	0,21	3,5	0,14	3,41	0,13	2,6	0,08	0,78	0,04	2,31	0,06	0,93
04:00	Объект	2,17	7,09	0,37	4,03	0,2	5,03	0,3	4,01	0,11	1,16	0,07	1,98	0,1	0,96
04:30	Объект	1,29	7,32	0,23	3,79	0,15	3,24	0,13	3,77	0,09	1,43	0,07	1,61	0,06	0,92
05:00	Объект	1,7	10,27	0,22	3,66	0,16	3,4	0,13	2,93	0,1	0,88	0,06	1,67	0,08	1,06
05:30	Объект	1,37	8,14	0,22	3,04	0,13	4,24	0,13	2,92	0,08	0,82	0,06	2,21	0,07	0,92
06:00	Объект	2,04	7,15	0,25	4,73	0,18	3,82	0,15	3,45	0,1	1,1	0,06	2,08	0,09	1,04

Рис. 1. Фрагмент таблицы значений гармонических составляющих тока для фазы А

На рис. 2 представлены графики изменения коэффициента третьей гармонической составляющей тока $K_{I(3)}$, %, по каждой из фаз трёхфазной электрической сети в выбранной точке контроля на шинах 220 кВ ПС за 7 суток.

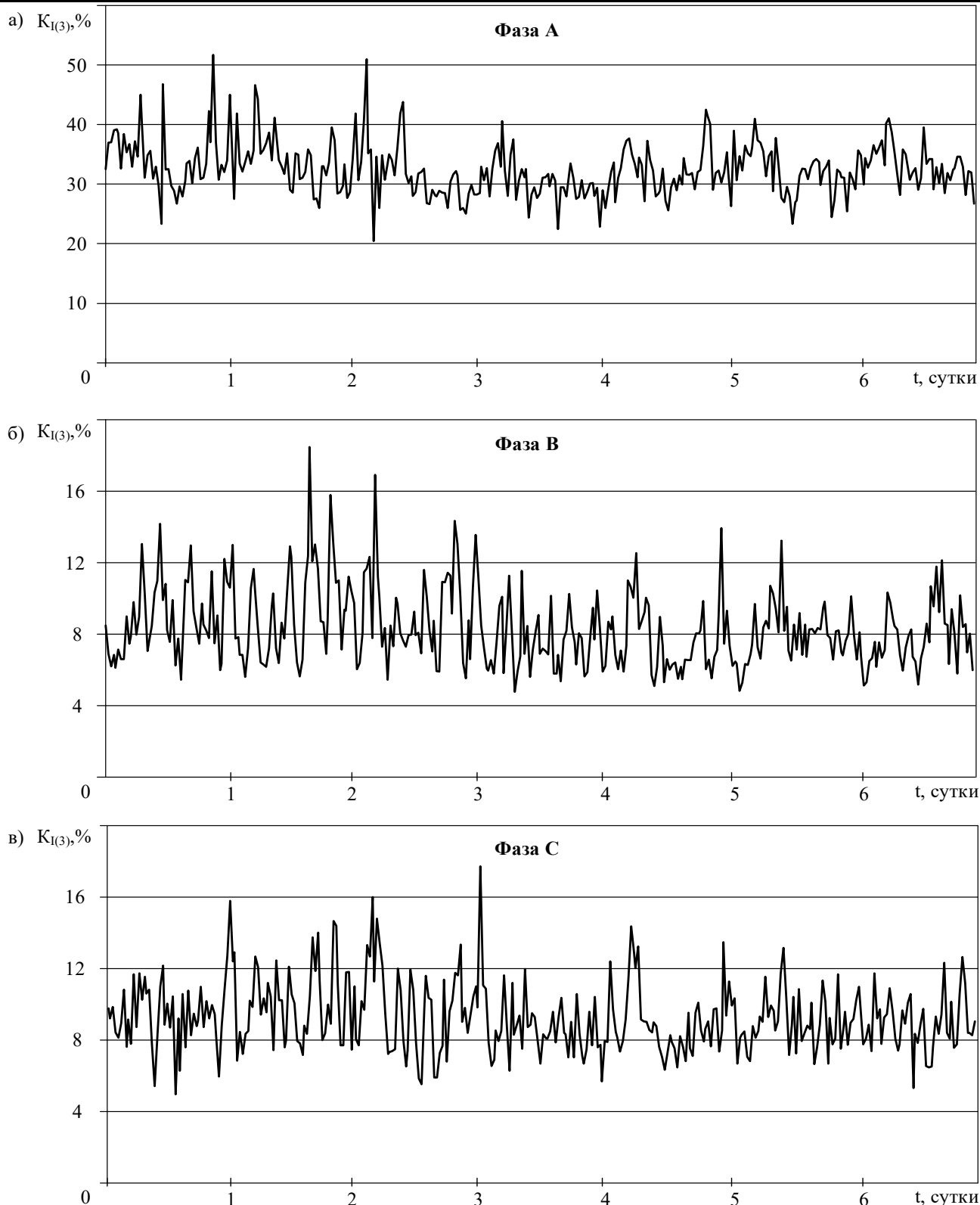


Рис. 2. Значения $K_{I(3)}$ по фазам для шин 220кВ ПС1 за неделю: а – фаза А, б – фаза В, в – фаза С

Результаты расчётов и оценки КЭ. Результаты сравнения рассчитанных ПКЭ для ВГС тока со второй по 15-ю включительно с нормируемыми значениями 95 % и 99 % уровней по IEEE 519-2022 [12] приведены на рис. 3.

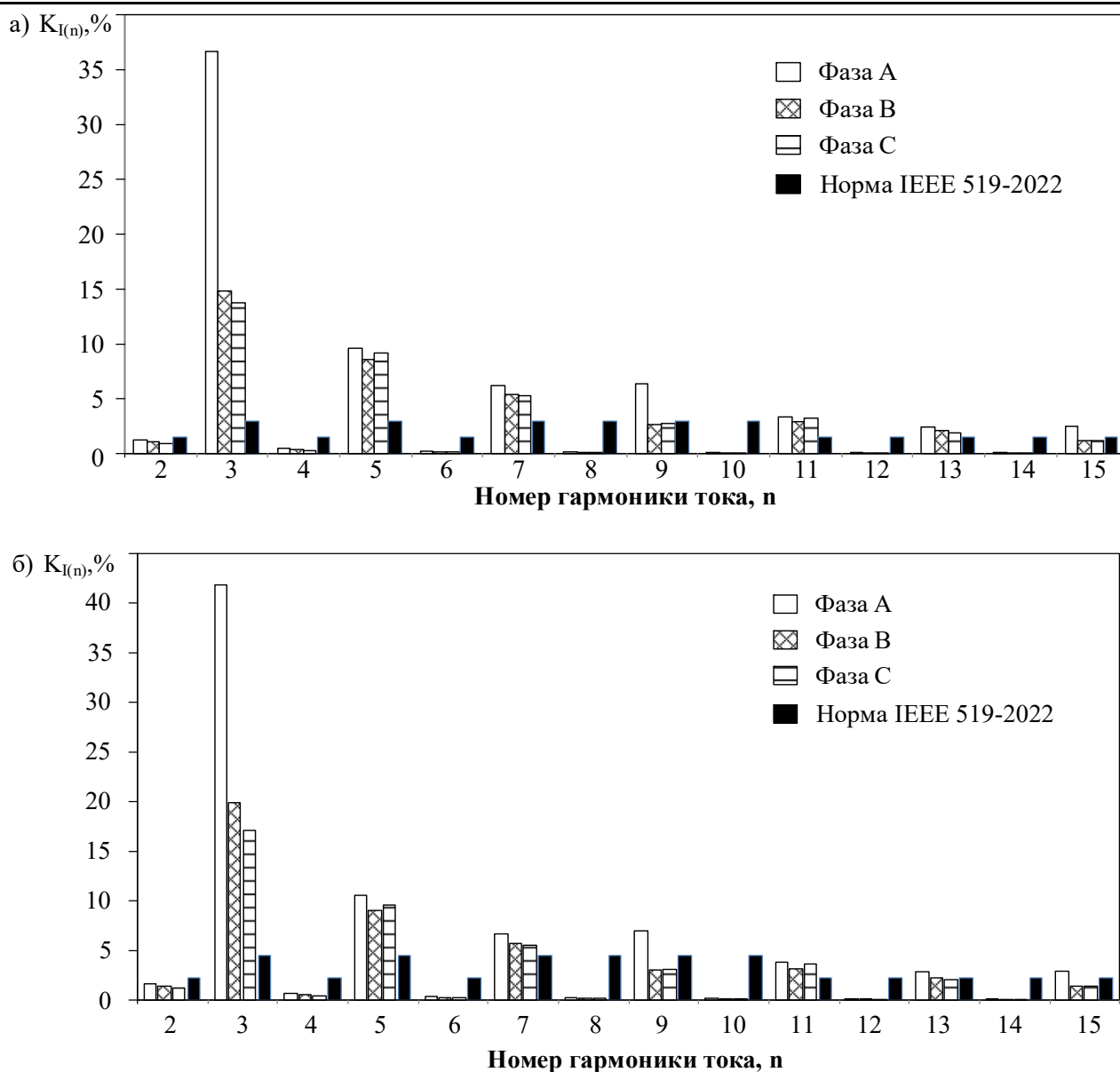


Рис. 3. Результаты сравнения рассчитанных значений $K_{I(n)}$ ПС1
для 95 % уровня (а); 99 % уровня (б)

Результаты итоговой оценки степени соответствия качества тока на участке транзита 220 кВ ПС1 и ПС 2 представлены в табл. 3.

Как можно заключить из результатов проведенного исследования, качество тока по двум объектам исследования можно определить как неудовлетворительное, поскольку рассчитанные значения $K_{I(n)}$ по гармоническим составляющим нечётных ВГС значительно превышают как 95 %, так и 99 % значения уровней, регламентируемых IEEE 519-2022.

Например, в результате расчёта для ПС1 значения $K_{I(3)}, \%$, по фазам А; В; С соответственно составили следующие величины:

- максимальные: 51,66; 25,33; 24,12;
- 95 % уровень: 41,82; 19,9; 17,07 (при норме [12] 4,5 %);
- 99 % уровень: 36,65; 14,79; 13,73 (при норме [12] 3,0 %).

Как можно заключить, регламентируемые IEEE 519-2022 уровни многократно превышены, что позволяет констатировать, что КЭ на шинах 220 кВ ПС1 по $K_{I(3)}$ неудовлетворительное.



Итоги оценки соответствия $K_{I(n)}$ требованиям IEEE 519-2022 [12]

Номер ВГС то- ка, n	ПС1, шины 220 кВ			ПС2, шины 220 кВ		
	95%	99%	оценка КЭ	95%	99%	оценка КЭ
2	не соотв.	не соотв.	неуд.	соотв.	соотв.	удов.
3	не соотв.	нет	неуд.	не соотв.	не соотв.	неуд.
4	соотв.	нет	неуд.	соотв.	соотв.	удов.
5	не соотв.	нет	неуд.	не соотв.	не соотв.	неуд.
6	соотв.	нет	неуд.	соотв.	соотв.	удов.
7	не соотв.	нет	неуд.	не соотв.	не соотв.	неуд.
8	соотв.	нет	неуд.	соотв.	соотв.	удов.
9	не соотв.	нет	неуд.	не соотв.	не соотв.	неуд.
10	соотв.	нет	неуд.	соотв.	соотв.	удов.
11	не соотв.	нет	неуд.	не соотв.	не соотв.	неуд.
12	соотв.	нет	неуд.	соотв.	соотв.	удов.
13	не соотв.	нет	неуд.	не соотв.	не соотв.	неуд.
14	соотв.	нет	неуд.	соотв.	соотв.	удов.
15	не соотв.	нет	неуд.	не соотв.	не соотв.	неуд.

Также рассчитанные значения суммарного коэффициента искажений кривой тока, отнесённые к максимальному потребляемому току в точке контроля, для каждой фазы обоих объектов (TDD или K_I) значительно превышают нормативное значение по [12], равное 3,75 %, и составляют:

1. для ПС1: фаза А – 45,05 %, фаза В – 44,76 %, фаза С – 46,39 %;
2. для ПС2: фаза А – 11,01 %, фаза В – 5,76 %, фаза С – 5,53 %.

Интерес для дальнейшего научного исследования представляет выявленная существенная разница в значениях ПКЭ для двух территориально близких ПС, что вызвано достаточно широким кругом причин – от различия характера, режимов работы и мощности питаемой нагрузки до различия в параметрах электрической сети. Для более точного указания возможных причин снижения КЭ на исследуемых объектах необходим анализ электрических характеристик, включая различия в характере подключённой нагрузки и топологические особенности их технологического присоединения и т. д, что не являлось целью проводимой работы. Тем не менее произведённая количественная оценка качества тока на участках транзита электрической энергии позволила установить, что натурно измеренные значения ПКЭ по току достаточно далеки от граничных значений, регламентированных IEEE 519-2022, что не позволяет применять значения этого регламента для ПКЭ по искажению кривых тока к отечественным энергообъектам без пересмотра и обоснования указанных уровней. Тем не менее выявленное по результатам анализа низкое КЭ по ВГС тока затрудняет эффективное функционирование электросетевых объектов и потребителей электрической энергии, поэтому авторы считают необходимым привлечь внимание научной общественности к вопросу стандартизации качества тока в нашей стране и проведению научно-исследовательских работ по обоснованию и введению регламентированных значений ПКЭ в части качества тока в отечественных нормативных документах для электросетевых объектов высокого напряжения.

Заключение. В ходе проведённого исследования выявлено существенное отставание в разработке отечественных нормативных требований по качеству тока для высоковольтных электросетевых объектов. Произведённая количественная оценка ВГС тока по регламенту IEEE 519-2022 выявила существенные расхождения измеренных и рассчитанных значений исследуемых ПКЭ с их регламентированными значениями, что даёт возможность оценить КЭ по нечётным ВГС тока как неудовлетворительное для двух исследуемых контрольных точек, расположенных на шинах

220 кВ ПС на участке транзита электрической энергии. Выявленное неудовлетворительное КЭ как по отдельным гармоническим составляющим, так и по суммарному коэффициенту искажений кривой тока не позволяет использовать количественные значения ПКЭ, регламентируемые IEEE 519-2022, в качестве граничных значений для разработки отечественных норм гармонических искажений тока без учёта специфики работы и состояния отечественных электрических сетей и систем. Необходимо продолжение исследований с целью определения и обоснования граничных значений ПКЭ, учитывающих специфику работы отечественных электросетевых объектов. Тем не менее привлечение внимания научной и производственной общественности к проблемам качества тока позволит активизировать разработку отечественной нормативной базы, отвечающей динамично изменяющимся и растущим потребностям современного общества, что положительно скажется на развитии систем мониторинга и контроля КЭ и повышении эффективности работы электроэнергетической отрасли в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макашева, С. И. Качество тока: аспекты оценки и нормирования / С. И. Макашева, П. С. Пинчуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 23-35.
2. Макашева, С. И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление / С. И. Макашева, П. С. Пинчуков. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. – 2020. – 114 с.
3. Montoya F. G., García-Cruz A., Montoya M. G., Manzano-Agugliaro F. Power Quality Techniques Research Worldwide: a Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, Vol. 54, pp. 846-856, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.091>.
4. Sharma A., Rajpurohit B.S., Singh, S. N. A Review on Economics of Power Quality: Impact, Assessment and Mitigation. Renewable and Sustainable Energy Review, 2018, 88, pp. 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.011>.
5. Белей, В. Ф. О необходимости контроля и нормирования гармоник тока / В. Ф. Белей, К. В. Коротких // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 6 (87). – С. 44-51.
6. Старинский, Н. И. Разработка регулятора по поиску оптимальной частоты для системы асинхронный двигатель – автономный инвертор напряжения / Н. И. Старинский, А. В. Гуляев, Д. С. Фокин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № V (77). – С. 4-12.
7. Проблемы обеспечения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения / А. Б. Васенин, С. Е. Степанов, Е. С. Подшивалов, О. В. Крюков // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2023. – № 9 (170). – С. 34-43.
8. Исследование несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями / Н. Н. Долгих, Д. С. Осипов, А. О. Шепелев, Е. Ю. Шепелева // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2024. – № 3 (102). – С. 7-17.
9. Исследование системы бесконтактного контроля функционирования воздушных линий в условиях низкого качества электроэнергии / А. М. Брамм, А. И. Хальясмаа, С. Ф. Сарапулов, В. П. Метельков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2026. – Т. 26. – № 1. – С. 24-31.
10. Об утверждении требований к качеству электрической энергии, в том числе распределению обязанностей по его обеспечению между субъектами электроэнергетики и потребителями электрической энергии: Приказ Министерства энергетики РФ от 28 августа 2023 г. № 690 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1303085066> (дата обращения: 17.03.2026). – Текст: электронный.
11. Исследование воздействия сильной магнитной бури на Объединённую энергетическую систему Центра России / А. А. Тренькин, С. В. Воеводин, О. Н. Коблова [и др.] // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2023. – Т. 508. – № 1. – С. 64-67.
12. Are you compliant with the IEEE-519 2022 Edition // компания ELSPEC – поставщик передовых анализаторов качества электроэнергии и решений для контроля качества электроэнергии: сайт. – URL: <https://www.elspec-ltd.com/are-you-compliant-with-the-ieee-519-2022-edition/> (дата обращения: 17.04.2026). – Текст: электронный.



REFERENCES

1. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Kachestvo toka: aspekty otsenki i normirovaniya [Quality of current: aspects of assessment and standardization]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 4, pp. 23-35. (In Russian). <https://doi.org/10.14529/power200403>.
2. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Kachestvo elektricheskoy energii: monitoring, prognoz, upravlenie [Quality of electrical energy: monitoring, forecasting, control]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2020. 114 p. (In Russian)
3. Montoya F.G., García-Cruz A., Montoya M.G., Manzano-Agugliaro F. Power Quality Techniques Research Worldwide: a Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 54, pp. 846-856. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.091>.
4. Sharma A., Rajpurohit B.S., Singh S.N. A Review on Economics of Power Quality: Impact, Assessment and Mitigation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, vol. 88, pp. 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.011>.
5. Beley V.F., Korotkikh K.V. O neobkhodimosti kontrolya i normirovaniya garmonik toka [On the need for control and standardization of current harmonics]. Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electric Power. Transmission and Distribution], 2024, no. 6(87), pp. 44-51. (In Russian)
6. Starinsky N.I., Gulyaev A.V., Fokin D.S. Razrabotka regulyatora po poisku optimal'noy chastoty dlya sistemy asinkhronnyy dvigatel' – avtonomnyy inverter napryazheniya [Development of a regulator for searching the optimal frequency for the system "asynchronous motor – autonomous voltage inverter"]. Uchenye zapiski Komсомольского-на-Амуре gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Engineering Sciences], 2024, no. V(77), pp. 4-12. (In Russian).
7. Vasin A.B., Stepanov S.E., Podshivalov E.S., Kryukov O.V. Problemy obespecheniya kachestva elektroenergii v promyshlennnykh sistemakh elektrosnabzheniya [Problems of ensuring power quality in industrial power supply systems]. Avtomatizatsiya i IT v energetike [Automation and IT in Power Engineering], 2023, no. 9(170), pp. 34-43. (In Russian).
8. Dolgikh N.N., Osipov D.S., Shepelev A.O., Shepeleva E.Yu. Issledovanie nesinusoidal'nykh rezhimov raboty elektrooborudovaniya v sistemakh elektrosnabzheniya s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami [Study of non-sinusoidal operating modes of electrical equipment in power supply systems with semiconductor converters]. Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta [Bulletin of the North Caucasus Federal University], 2024, no. 3(102), pp. 7-17. (In Russian). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.1>.
9. Bamm A.M., Khalyasmaa A.I., Sarapulov S.F., Metelkov V.P. Issledovanie sistemy beskontaktnogo kontrolya funktsionirovaniya vozdukhnykh liniy v usloviyakh nizkogo kachestva elektroenergii [Study of a contactless monitoring system for overhead line operation under low power quality conditions]. Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika" [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2026, vol. 26, no. 1, pp. 24-31. (In Russian). <https://doi.org/10.14529/power260103>.
10. Ob utverzhdenii trebovaniy k kachestvu elektricheskoy energii, v tom chisle raspredeleniyu obyazannostey po ego obespecheniyu mezhdru sub"ektami elektroenergetiki i potrebiteleyami elektricheskoy energii [On approval of requirements for the quality of electrical energy, including the distribution of responsibilities for its provision between subjects of the electric power industry and consumers of electrical energy]: Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated August 28, 2023, no. 690. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1303085066> (accessed 17 March 2026). (In Russian).
11. Trenkin A.A., Voevodin S.V., Koblova O.N., et al. Issledovanie vozdeystviya sil'noy magnitnoy buri na Ob"edinennuyu energeticheskuyu sistemu Tsentra Rossii [Study of the impact of a strong magnetic storm on the Unified Energy System of Central Russia]. Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki [Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences], 2023, vol. 508, no. 1, pp. 64-67. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S2686740023010108>.
12. Are you compliant with the IEEE-519 2022 Edition. ELSPEC – provider of advanced power quality analyzers and power quality monitoring solutions. Available at: <https://www.elspec-ltd.com/are-you-compliant-with-the-ieee-519-2022-edition/> (accessed 17 April 2026).

Фокин Д. С., Гуляев А. В., Тен Е. Е.
D. S. Fokin, A. V. Gulyaev, E. E. Ten

**ОЦЕНКА ДОСТАТОЧНОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ
ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРИЧИННОСТИ В СУДЕБНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ
ЭКСПЕРТИЗЕ**

**ASSESSING THE SUFFICIENCY OF SOURCE DATA FOR ESTABLISHING TECHNICAL
CAUSALITY IN FORENSIC ELECTRICAL ENGINEERING EXAMINATION**

Фокин Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент Высшей школы кибернетики и цифровых технологий Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); тел. +7(4212)979-700. E-mail: dimkof27@mail.ru.

Dmitry S. Fokin – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Cybernetics and Digital Technologies, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); tel. +7(4212)979-700. E-mail: dimkof27@mail.ru.

Гуляев Александр Викторович – доцент кафедры «Автоматизированные, телекоммуникационные и электротехнические системы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. +7(914)312-7984. E-mail: 89143127984@ya.ru.

Alexander V. Gulyaev – Associate Professor, Department of Automated, Telecommunication, and Electrotechnical Systems, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. +7(914)312-7984. E-mail: 89143127984@ya.ru.

Тен Евгений Енгунович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные, телекоммуникационные и электротехнические системы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. +7(914)548-1064. E-mail: ugene_ten@mail.ru.

Evgeny E. Ten – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Automated, Telecommunication and Electrotechnical Systems, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. +7(914)548-1064. E-mail: ugene_ten@mail.ru.

Аннотация. При установлении технической причины электротехнического происшествия полнота материалов важна не сама по себе. Один и тот же набор данных может быть достаточен для диагностического вопроса и недостаточен для причинного. В работе предложен порядок оценки достаточности исходных сведений при неполной сохранности объекта. Он включает маркировку установленных сведений, реконструированных состояний и допущений, проверку временной последовательности, формирование альтернативных технических сценариев и сопоставление их следствий с наблюдаемыми признаками. Критерием достаточности служит устойчивость ответа на конкретный экспертный вопрос в пределах множества не опровергнутых сценариев. Если ответы совпадают, неопределённость отдельных обстоятельств не препятствует выводу; если различаются, определяется признак, способный разграничить версии и тем самым содержание запроса дополнительных материалов. Порядок проиллюстрирован тремя обезличенными ситуациями с различной сохранностью объекта. Для воздушной линии 0,4 кВ сопоставлены четыре сценария повреждения с доступными наблюдениями и результатами моделирования из исходного экспертного заключения. Численные данные, отсутствующие в материалах, расчётными допущениями не восполнялись.

Summary. When establishing the technical cause of an electrical incident, the amount of available material is not sufficient by itself: the same evidence can support a diagnostic answer while remaining insufficient for a causal one. This paper proposes a procedure for assessing source-data sufficiency when the original electrical installation is only partly preserved. The procedure separates established information, reconstructed states and assumptions; checks the temporal sequence; generates alternative technical scenarios; and compares their consequences with observed evidence. Sufficiency is defined by the stability of the answer to a specific expert question within the set of non-refuted scenarios. If all such scenarios lead to the same answer, uncertainty in secondary circumstances does not necessarily prevent a conclusion. If the answers differ, the procedure identifies the feature capable of discriminating between the competing scenarios and thereby specifies what additional information is required. The procedure is illustrated by three anonymized situations. For a 0.4 kV overhead line, four damage scenarios are compared with available observations and modeling results reported in the original expert examination. Missing numerical data are not reconstructed by assumption.



Ключевые слова: судебная электротехническая экспертиза, техническая причинность, достаточность исходных данных, экспертный вопрос, альтернативный сценарий, электротравма, воздушная линия, компьютерное моделирование, экспертное заключение.

Key words: forensic electrical engineering examination, technical causality, source data sufficiency, expert question, alternative scenario, electric injury, overhead line, computer modeling, expert conclusion.

УДК 343.148:621.31

Обнаруженный дефект не всегда объясняет причину электротехнического происшествия. Повреждение изоляции, нарушение защитной цепи, следы нагрева или несоответствие требованиям нормативной документации требуют отдельной проверки их связи с конкретным последствием. Необходимо установить, существовало ли выявленное состояние до происшествия, могло ли оно вызвать рассматриваемый процесс при фактической схеме подключения и режиме работы оборудования и не было ли само повреждение следствием аварии.

Судебная электротехническая экспертиза относится к инженерно-техническим исследованиям, в которых вывод формируется на основе специальных знаний об устройстве электроустановок, режимах электрических сетей, работе защитной аппаратуры и физических механизмах повреждения оборудования. Федеральный закон о государственной судебно-экспертной деятельности связывает заключение эксперта с проведением исследования по вопросам, требующим специальных знаний [1]. Инструкция Минюста России предусматривает предоставление эксперту объектов и материалов, необходимых для исследования [2].

При утрате части объекта причинная задача усложняется. Несколько физически допустимых сценариев могут объяснять одни и те же сохранившиеся признаки, а часть параметров приходится восстанавливать по документам, фотографиям и косвенным наблюдениям. Поэтому достаточность материалов нельзя сводить к их объёму. Значение имеют происхождение каждого сведения, его относимость к исследуемому моменту и способность разграничить версии. Такой подход согласуется с общими положениями судебной экспертологии о связи объекта, задачи, метода и фактической основы вывода [3; 4].

Проверка гипотез на совместимость с моделью и наблюдаемым поведением является базовым принципом модельно-ориентированной диагностики [5; 6]. В судебном исследовании электротравм к этому добавляется реконструкция фактической электрической цепи и проверка причинной роли обнаруженных дефектов; такая последовательность подробно рассматривается в современной методологии судебно-инженерного анализа [7]. Публикации по расследованию электротравм показывают практическую значимость совместного анализа состояния электрооборудования, следовой информации и иных независимых признаков [8]. Эти работы подтверждают необходимость сопоставления версии с совокупностью наблюдений, но не задают критерия, при котором имеющихся сведений достаточно именно для ответа на конкретный экспертный вопрос.

К наиболее близким современным работам относятся исследования судебной горнотехнической экспертизы. И. И. Пугач, В. В. Харченко и Ю. И. Чеберячко формализуют сценарный анализ причинных связей и вводят количественную оценку уверенности эксперта в причинной гипотезе [9]. В более поздней работе рассматриваются ограничения каузального моделирования при неполноте исходных материалов и предлагается декомпозиция причинного анализа [10]. В настоящей статье решается иная задача: вероятность версии и субъективная уверенность не оцениваются, а достаточность связывается с устойчивостью ответа на конкретный экспертный вопрос при переходе между всеми технически значимыми сценариями, которые не удалось опровергнуть доступными данными. Вопросы экспертизы в энергетике и электротехнике ранее были рассмотрены А. А. Бурнос и А. В. Гуляевым [11]. Здесь предмет исследования сужен до оценки достаточности исходной информации для технического причинного вывода.

Цель работы – разработать порядок оценки достаточности исходных данных при установлении технической причины электротехнического происшествия. Для этого необходимо: отделить установленные сведения от реконструкций и допущений; проверить временную последователь-

ность причинно-значимых состояний; сопоставить следствия альтернативных технических сценариев с доступными признаками; установить устойчивость ответа на конкретный экспертный вопрос и, при её отсутствии, определить сведения, способные разграничить конкурирующие версии.

Объект и методы исследования. Объектом исследования является процесс формирования технического причинного вывода при неполной информации об исходном состоянии электроустановки. Предмет исследования – зависимость возможности ответа на экспертный вопрос от состава, происхождения и разграничивающей способности имеющихся сведений. Работа носит методический, а не статистический характер. Три случая отобраны целенаправленно, чтобы представить разные степени сохранности объекта: непосредственное исследование переносного электрооборудования, реконструкция аварийного режима воздушной линии 0,4 кВ и исследование электрической сети после пожара.

Первые два материала представляют собой судебные электротехнические экспертизы, выполненные автором в 2021 г. Третий материал используется только как методический пример последовательной проверки нескольких версий после пожара и не рассматривается как самостоятельная апробация предлагаемого порядка. Персональные данные, номера дел, адреса и наименования организаций исключены. Технические сведения сохранены в объёме, необходимом для анализа метода.

В первой ситуации эксперт располагал электрическим вибратором, удлинителем и материалами дела. Были выявлены повреждение изоляции, обрыв защитного проводника, изменения соединений, незакреплённый элемент внутри корпуса и повреждение контактной части удлинителя. Численные протоколы измерения сопротивления изоляции, непрерывности защитной цепи и других электрических параметров в предоставленном тексте заключения отсутствуют. Поэтому этот эпизод используется для разграничения диагностического вывода о неисправности и причинного вывода, а не для повторной количественной проверки механизма электротравмы.

Во второй ситуации исходное положение проводников воздушной линии после падения опоры не сохранилось. В материалах указаны напряжение 0,4 кВ, система электроснабжения с глухозаземлённой нейтралью, провод АС-35 и три плавкие вставки 250 А на отходящей линии. После повреждения часть потребителей продолжала работать. В заключении рассмотрены варианты обрыва фазного и нулевого проводников, их перехлёста и замыкания на землю. Для принятого реконструированного режима приведены два численных результата: возможность протекания через человека тока более 50 мА и токи фаз около 170 А. Последняя величина ниже номинала плавких вставок 250 А и использована в исходном заключении при объяснении отсутствия отключения линии. Термин «нулевой проводник» воспроизводится по исходному заключению: сведений, позволяющих однозначно квалифицировать его как N- или PEN-проводник, в предоставленном тексте нет. Полный набор параметров компьютерной модели также не приведён, поэтому численные результаты не выдаются за независимо воспроизведённый расчёт.

В третьей ситуации внутренняя электрическая сеть была существенно повреждена пожаром. В методическом материале сопоставлялись версии, связанные с коротким замыканием, температурным режимом автоматического выключателя и локальным нагревом контактного соединения. Марка аппарата, источник температурного значения и полный набор параметров нагрузки в имеющемся материале не указаны. Этот эпизод используется только для демонстрации проверки предпосылок версии; самостоятельный вывод о причине пожара на его основе в статье не формируется.

Методы исследования включали сравнительный анализ, функциональную классификацию исходных сведений, маркировку их происхождения, построение альтернативных сценариев, проверку временной последовательности и сопоставление расчётных или качественных следствий с наблюдаемыми признаками. Теория модельно-ориентированной диагностики Р. Рейтера и Дж. де Клера использована как основа проверки совместимости гипотез с поведением системы [5; 6], а положения судебно-инженерного анализа – как основа реконструкции физического механизма события [12].



1. Происхождение исходных сведений. До выбора расчётной модели сведения целесообразно разделить не только по содержанию, но и по способу их получения. Структура исходных данных приведена в табл. 1. В настоящей работе используются три статуса:

1. *F* (fact) – установленное исходное сведение, которое в рамках данного исследования принимается без дополнительной реконструкции и имеет прослеживаемый источник: объект, документ, измерение, фотографию или иной проверяемый материал. Статус *F* не означает «абсолютную истинность» документа, а фиксирует отсутствие расчётного восстановления со стороны эксперта.

2. *R* (reconstruction) – состояние, восстановленное из совокупности исходных сведений и модели.

3. *A* (assumption) – допущение, необходимое для проверки сценария, но непосредственно не подтверждённое материалами. Переход *R* или *A* в разряд *F* без самостоятельного основания недопустим.

Таблица 1

Функциональные группы исходных данных и их роль в причинном исследовании

Группа данных	Примеры	Функция	Возможный статус
Объектные	Оборудование, проводники, аппараты защиты, контактные соединения	Непосредственное установление состояния и повреждений	<i>F</i> ; при утрате объекта – <i>R</i>
Документальные	Проекты, паспорта, журналы, акты, протоколы измерений	Восстановление параметров и истории эксплуатации	<i>F</i> , если происхождение и относимость подтверждены
Ситуационные	Положение аппаратов, наличие нагрузки, последовательность включений, работа соседних потребителей	Описание фактического режима до и во время события	<i>F</i> или <i>R</i>
Следовые	Состояние изоляции и контактов, термические повреждения, фотографии, электрометки	Проверка характера и направления физического процесса	<i>F</i> ; причинная интерпретация – <i>R</i>
Нормативные	ПУЭ [13], правила технической эксплуатации [14], проектные требования	Оценка соответствия установленного состояния требованиям	Не определяют причинность самостоятельно
Расчётно-модельные	Схемы замещения, токи, работа защиты, компьютерные модели	Проверка физической реализуемости сценария	<i>R</i> , основанное на <i>F</i> и явно указанных <i>A</i>

Такая маркировка показывает, в какой точке причинный вывод перестаёт опираться непосредственно на исходный материал и начинает зависеть от реконструкции или допущения. Это особенно важно после пожара, механического разрушения или изменения схемы после происшествия: расчёт может быть внутренне корректным, но его применимость к фактическому режиму определяется качеством исходных предпосылок.

2. От дефекта к технической причине. В первой экспертной ситуации несколько неисправностей существовало одновременно. Для диагностического вопроса «исправно ли оборудование» этого достаточно: наличие хотя бы одного подтверждённого дефекта уже определяет отрицательный ответ. Для вопроса о технической причине электротравмы перечня дефектов недостаточно. Необходимо показать, какие из них существовали до происшествия и какие участвовали в формировании опасного электрического режима.

Проверку механизма удобно проводить по причинной цепочке:

$$D * \rightarrow S \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow C,$$

где D^* – один причинно-значимый дефект или сочетание нескольких дефектов; S – вызванное ими состояние системы; E – электрический процесс; H – опасное воздействие; C – наблюдаемое последствие. Защитный аппарат рассматривается как отдельный барьер между электрическим процессом и опасным воздействием. Если защита должна была разорвать цепь, необходимо установить её фактическое состояние, уставку, условия срабатывания и причину, по которой опасное воздействие всё же возникло.

Для причинного вывода важна не только логическая, но и временная согласованность звеньев. Выявленный после происшествия дефект может быть его следствием. Минимальное условие последовательности можно записать так:

$$t(D *) \leq t(S) \leq t(E) \leq t(H) \leq t(C).$$

Если момент возникновения ключевого дефекта не установлен и из материалов нельзя исключить его появление после события, причинное значение этого дефекта должно формулироваться условно. Именно здесь диагностический вывод и причинный вывод расходятся.

3. Проверка технических сценариев. Сценарий сохраняется для дальнейшего анализа, если его расчётные или качественные следствия не противоречат проверенным исходным сведениям с учётом погрешности измерений, неопределённости реконструкции и области применимости модели. Нормативная оценка выполняется отдельно: соответствие или несоответствие требованиям ПУЭ и правил технической эксплуатации [13; 14] само по себе не устанавливает причинную роль выявленного нарушения. Аварийный сценарий может быть физически реализуемым именно вследствие нарушения нормативного требования.

Для каждого сценария используется один из трёх статусов результата проверки: C – «не противоречит данным»; X – «опровергнут»; U – «недостаточно данных для проверки». Статус C не означает доказанность сценария, а только отсутствие выявленного противоречия с доступными признаками. Статус U фиксирует информационный разрыв и не должен автоматически трактоваться ни как подтверждение, ни как опровержение. Множество всех неопровергнутых сценариев обозначим S^* :

$$S^* = \{S_i \in S: z_i \in \{C, U\}\}.$$

При сравнении следствий $Y(S_i)$ с фактическими признаками Y_f заранее определяются сами проверяемые признаки и правило совместимости. Для численного параметра это допустимое расхождение с учётом погрешности измерения и модели; для качественного признака – логическая совместимость. Если необходимого параметра нет, соответствующая проверка получает статус U , а не X . Такое правило препятствует скрытой подмене отсутствующего сведения удобным для выбранной версии допущением. Сопоставление сценариев повреждения представлено в табл. 2.

4. Иллюстрация на материале воздушной линии 0,4 кВ. Материал по воздушной линии позволяет показать работу предлагаемого порядка без подстановки отсутствующих величин. К исходным сведениям относятся: сеть 0,4 кВ с глухозаземлённой нейтралью, провод АС-35, три плавкие вставки 250 А, продолжение работы части потребителей после падения опоры и факт электротравмы. Исходное заключение рассматривает несколько вариантов повреждения проводников. Для сценария, признанного экспертом наиболее вероятным, моделирование дало ток через человека более 50 мА и токи фаз около 170 А. Вместе с тем из текста заключения следует, что сохранение работы части потребителей совместимо не с одним вариантом повреждения. Следовательно, этот наблюдаемый признак не может сам по себе определить, какой именно проводник был оборван.

Сопоставление показывает, почему число оставшихся версий не является основным критерием достаточности. По признаку сохранения электроснабжения нельзя однозначно определить оборванный проводник: ему не противоречит более одного сценария. Для другого вопроса: «Могла ли после повреждения вообще сохраняться передача электроэнергии?» – тот же набор сведений



уже достаточен для положительного ответа. Следовательно, достаточность определяется содержанием конкретного экспертного вопроса и тем, меняется ли ответ при допустимой смене сценария.

Таблица 2

Сопоставление сценариев повреждения ВЛ 0,4 кВ с доступными наблюдениями

Сценарий	Расчётный или физический признак	Фактическое наблюдение	Статус	Остающаяся неопределённость
S1. Обрыв нулевого проводника без перехлёста с фазными; возможное неполное замыкание фазного проводника на землю	По исходному моделированию передача энергии сохраняется; ток через человека > 50 мА; токи фаз около 170 А, что ниже 250 А плавких вставок	Часть потребителей продолжала работать; имело место поражение током; защита, по описанию, не отключила линию	C – не противоречит данным	Не раскрыты фазные нагрузки, сопротивления заземления, полная схема модели; тип нулевого проводника N/PEN не установлен
S2. Обрыв фазного проводника без перехлёста	По повреждённой фазе передача прекращается; по другим фазам может сохраняться	Известно лишь, что часть потребителей продолжала работать	U – недостаточно данных	Не указано, к каким фазам были подключены наблюдаемые потребители
S3. Обрыв фазного проводника и перехлест с другим фазным проводником	В исходном заключении такой режим признан технически совместимым с сохранением работоспособности части потребителей; возможно межфазное КЗ	Часть потребителей продолжала работать; полный протокол состояния защит отсутствует	C – не противоречит данным	Нужны фазная принадлежность нагрузки, токи КЗ и фактическое состояние каждой плавкой вставки
S4. Обрыв нулевого проводника и перехлест с фазным	Возможен полный ток КЗ и срабатывание защиты	В доступном материале нет полного протокола срабатывания защит для этого варианта	U – недостаточно данных	Нужны параметры петли, ток КЗ, тип нулевого проводника и фактическое состояние плавких вставок

Значения 50 мА и 170 А взяты из исходного экспертного заключения. Они характеризуют результаты той модели, которая использовалась при экспертизе, но не позволяют повторить расчёт независимо: в предоставленном тексте отсутствуют полный набор сопротивлений, фазные нагрузки, параметры заземления и файл модели. В настоящей статье эти значения используются только для анализа структуры обоснования экспертного вывода, а не как новый расчётный или экспериментальный результат.

5. Устойчивость ответа как критерий достаточности. Основным критерием предлагается считать устойчивость ответа на конкретный экспертный вопрос q внутри множества неопровергнутых сценариев S^* . Пусть $A_q(S_i)$ – ответ на вопрос q при сценарии S_i . В пределах сформированного множества сценариев данные считаются достаточными для данного вопроса, если ответ не меняется при переходе между любыми сценариями, которые не удалось опровергнуть:

$$\forall S_i, S_j \in S^* : A_q(S_i) = A_q(S_j).$$

Если ответы различаются, причинная задача в имеющемся виде не является однозначно решённой. В этом случае требуется искать не «дополнительные материалы вообще», а конкретный признак, который принимает различающиеся значения в сценариях с разными ответами. Такой признак задаёт содержание целевого запроса дополнительных данных. Были сопоставлены зависимости достаточности материалов с экспертными вопросами (см. табл. 3).

Таблица 3

Зависимость достаточности материалов от содержания экспертного вопроса

Ситуация	Экспертный вопрос	Что установлено	Устойчивость ответа	Методический вывод
Переносное оборудование	Имеется ли неисправность?	Непосредственно выявлены повреждения изоляции, защитной цепи и контактов	Устойчива	Материал достаточен для диагностического ответа о неисправности
Переносное оборудование	Какой дефект стал технической причиной электротравмы?	Указана совокупность дефектов и предполагаемый путь тока; численные протоколы измерений и время возникновения части дефектов в тексте не приведены	Не установлена	Для категорического причинного ответа требуется подтверждение причинно активных дефектов и их существования до события
ВЛ 0,4 кВ	Какой проводник был оборван?	Сохранение работы части потребителей совместно как минимум с несколькими вариантами повреждения; фазная принадлежность нагрузок не раскрыта	Нет	Для разграничения нужны фазная принадлежность потребителей, состояние защит и дополнительные параметры режима
ВЛ 0,4 кВ	Показывает ли исходная модель физическую возможность опасного тока в сценарии S1?	В исходном заключении для выбранного сценария указаны ток через человека > 50 мА и токи фаз около 170 А при плавких вставках 250 А	Не оценивается между сценариями	Физическая возможность показана в рамках исходной модели; независимая воспроизводимость требует полного набора параметров
Пожар	Подтверждает ли версия о тепловом расцепителе установленный механизм?	В методическом материале её предпосылки сопоставлены с фактической температурой и отсутствием нагрузки	Ответ устойчив: нет	Опровержение отдельной версии не устанавливает автоматически иную причину пожара

Условие устойчивости является относительным к сформированному множеству S . Поэтому перед его применением необходимо отдельно обосновать полноту набора технически значимых сценариев для данного объекта и вопроса. Число непровергнутых сценариев $N^* = |S^*|$ остаётся только вспомогательной характеристикой. $N^* = 1$ не доказывает причину, если альтернативы были сформированы неполно; $N^* > 1$ не препятствует категорическому ответу, когда различия между сценариями не влияют на поставленный вопрос.

6. Определение недостающих данных. Если для вопроса q ответы в S^* различаются, недостающие данные следует искать среди признаков, которые принимают разные значения в конкурирующих сценариях. Для линии 0,4 кВ такими сведениями являются фазная принадлежность нагрузки, фактическое состояние каждой плавкой вставки, параметры петли фаза-ноль и заземления, а также полная схема модели. Для переносного оборудования – результаты измерения защитной цепи и изоляции, положение повреждений и сведения, позволяющие отнести причинно-значимые дефекты к периоду до происшествия.

Для пожарного эпизода существенны тип и характеристика автоматического выключателя, источник данных о температуре, положение аппарата, фактическая нагрузка и состояние контактного соединения до пожара. Если этих сведений нет, методически корректнее обозначить предел ответа и сформулировать требуемый запрос, чем замещать отсутствующий факт расчётным допущением.

7. Последовательность применения предлагаемого порядка:

1. Сформулировать конкретный технический вопрос и определить, какой ответ должен быть получен в результате исследования.

2. Составить перечень исходных сведений и присвоить каждому статус F , R или A , указав источник.

3. Проверить временную последовательность: причинно-значимое состояние должно существовать до соответствующего процесса и последствия.

4. Сформировать набор технических сценариев, достаточный по объекту и вопросу, не смешивая физическую реализуемость с нормативной оценкой.

5. Для каждого сценария перечислить проверяемые следствия и присвоить результату сопоставления статус C , X или U .

6. Сформировать множество S^* всех неопровергнутых сценариев и проверить устойчивость ответа A_q .

7. Если ответ неустойчив, определить признаки, разделяющие сценарии с разными ответами, и сформулировать целевой запрос недостающих материалов.

8. Для причинного вопроса дополнительно проверить непрерывность физической и временной цепочки $D^* \rightarrow S \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow C$ с учётом работы защитных устройств.

Предлагаемый порядок не заменяет частные методики исследования электрооборудования, сетей, контактных соединений или следов электрического воздействия. Его назначение – сделать проверяемой связь между исходными сведениями, техническими сценариями и конкретным ответом: показать, почему ответ сохраняется при допустимой неопределённости либо в какой точке возникает информационный разрыв.

Результаты. Сопоставление трёх эпизодов показало, что достаточность одних и тех же материалов зависит от содержания вопроса. При исследовании переносного оборудования наличие неисправности устанавливается непосредственным осмотром и не требует реконструкции причинного механизма. Ответ о технической причине электротравмы требует другого уровня доказательности: необходимо подтвердить, что причинно-значимые дефекты существовали до события и формировали электрическую цепь опасного воздействия.

На материале ВЛ 0,4 кВ продолжение работы части потребителей не разделяет все рассмотренные версии. Для одного сценария исходное моделирование показывает возможность опасного тока через человека более 50 мА при токах фаз около 170 А и плавких вставках 250 А. Однако фазная принадлежность наблюдаемых потребителей, полная схема замещения и параметры модели в представленном тексте не раскрыты. Поэтому приведённый расчёт подтверждает физическую реализуемость выбранного режима в границах исходной модели, но не превращает этот сценарий в единственно возможный.

В пожарном эпизоде разграничивающими оказались не новые расчёты, а проверка предположений уже предложенной версии. В материале сопоставлялась работа теплового расцепителя при температурах +30 и -25 °С; позднее были указаны температура -17 °С, отсутствие нагрузки и отключённое положение автоматического выключателя розеточной группы. В пределах этих исход-

ных сведений версия о задержке теплового расцепителя не согласуется с описанным режимом. Опровержение одной версии не доказывает другую и не даёт оснований автоматически присваивать оставшимся сценариям вероятность.

Основной результат состоит в переходе от оценки «сколько данных собрано» или «сколько версий осталось» к проверке устойчивости ответа на конкретный вопрос. Маркировка $F/R/A$ показывает происхождение исходной основы, статусы $C/X/U$ – результат проверки сценариев, а условие устойчивости фиксирует, влияет ли оставшаяся неопределённость на итоговый ответ. Эти операции не устраняют экспертное усмотрение, но делают видимыми места, в которых вывод зависит от реконструкции, допущения или отсутствующего признака.

Выводы:

1. Обнаруженная неисправность или нарушение нормативного требования не являются достаточным основанием для вывода о технической причине. Причинный вывод требует физически и временно согласованной последовательности от причинно-значимого состояния к опасному процессу и последствию.

2. Достаточность исходных данных должна оцениваться применительно к конкретному экспертному вопросу и обоснованно сформированному множеству технических сценариев. Если все непровергнутые сценарии приводят к одинаковому ответу, неопределённость обстоятельств, не влияющих на этот ответ, не препятствует его формулированию.

3. Единственность оставшегося сценария сама по себе не доказывает техническую причину: необходимо отдельно проверить полноту исходного набора версий, происхождение сведений, допущения модели и непрерывность причинного механизма.

4. Для контроля исходной основы предложено разделять сведения на установленные F , реконструированные R и допущения A , а результаты проверки сценариев – на «не противоречит данным» C , «опровергнут» X и «недостаточно данных» U . Такое разделение не является шкалой вероятности и не подменяет экспертную оценку.

5. При различии ответов между непровергнутыми сценариями следует определять конкретные признаки, способные разграничить версии и формировать адресный запрос дополнительных материалов. Само наличие нескольких версий не даёт основания присваивать им вероятности.

6. Компьютерное моделирование позволяет проверять следствия технического сценария, но воспроизводимость такого вывода ограничена раскрытыми параметрами и допущениями. В рассмотренном материале по ВЛ 0,4 кВ численные результаты исходной модели пригодны для анализа логики заключения, но недостаточны для независимого повторения расчёта.

ЛИТЕРАТУРА

1. О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации: Федеральный закон от 31 мая 2001 г. № 73-ФЗ // Гарант. – URL: <https://base.garant.ru/12123142/> (дата обращения: 12.08.2026). – Текст: электронный.
2. Об утверждении Инструкции по организации производства судебных экспертиз в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Министерства юстиции Российской Федерации: Приказ Минюста России от 28 декабря 2023 г. № 404 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1304475480> (дата обращения: 12.08.2026). – Текст: электронный.
3. Россинская, Е. Р. Теория судебной экспертизы (Судебная экспертология): учеб. / Е. Р. Россинская, Е. И. Галяшина, А. М. Зинин; под ред. Е. Р. Россинской. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Норма: ИНФРА-М, 2016. – 367 с.
4. Судебные инженерно-технические экспертизы: учебно-методическое пособие / Г. Г. Омелянюк, А. И. Усов, В. В. Гулевская, А. С. Савенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – 52 с.
5. Reiter R. A theory of diagnosis from first principles // Artificial Intelligence. 1987. Vol. 32, No. 1. P. 57-95. DOI: 10.1016/0004-3702(87)90062-2.
6. de Kleer J., Williams B. C. Diagnosing multiple faults // Artificial Intelligence. 1987. Vol. 32, No. 1. P. 97-130. DOI: 10.1016/0004-3702(87)90063-4.
7. Korinek C. Methodology and Tools for Forensic Engineering Analysis of Electrical Shocks // Journal of the National Academy of Forensic Engineers. 2023. Vol. 40, No. 1. DOI: 10.51501/jotnafe.v40i1.163.

8. Askar A. M., Alzarooni S. M., Habiballah M. M., Eissa R. M., Alremeithi R. H., Shah I. Diagnostic Forensic Tools in the Investigation of Electrocution Fatalities: A Case Study // *Analytical Science Advances*. 2025. Vol. 6, No. 2. e70032. DOI: 10.1002/ansa.70032.
9. Puhach I. I., Kharchenko V. V., Cheberyachko Yu. I. Self-Certainty Model for Expert Analysis of Causal Relationships in Forensic Mining Technical Examinations: Justification, Development, and Application // *Electrotechnical and Information Systems*. 2025. No. 108. P. 172-182. DOI: 10.32782/EIS/2025-108-21.
10. Puhach I. I., Cheberiyachko Y., Kharchenko V., Puhach I. Restrictions on Application of Causal Modeling Methods in Forensic Mining and Technical Examination and Ways to their Overcoming // *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*. 2026. Vol. 43, No. 2. P. 136-156. DOI: 10.32353/khrife.2.2026.09.
11. Бурнос, А. А. Экспертиза в энергетике и электротехнике / А. А. Бурнос, А. В. Гуляев, Д. С. Фокин // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодёжи (Хабаровск, 14-17 апреля 2020 г.): в 2 т. Т. 2 / под ред. А. Р. Едигаряна. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. – С. 30-35.
12. Noon R. K. *Forensic Engineering Investigation*. Boca Raton: CRC Press, 2001. 488 p. ISBN 0-8493-0911-5.
13. Правила устройства электроустановок // ТехЭкспо. – URL: <https://tech-expo.ru/pue/> (дата обращения: 12.08.2026). – Текст: электронный.
14. Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии: Приказ Минэнерго России от 12 августа 2022 г. № 811 // КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_428583/ (дата обращения: 12.08.2026). – Текст: электронный.

REFERENCES

1. Federal Law No. 73-FZ of 31 May 2001 On State Forensic Expert Activity in the Russian Federation.
2. Order of the Ministry of Justice of the Russian Federation No. 404 of 28 December 2023 On Approval of the Instruction for Organizing Forensic Examinations in Federal Budgetary Forensic Institutions of the Ministry of Justice of the Russian Federation.
3. Rossinskaya E. R., Galyashina E. I., Zinin A. M. *Theory of Forensic Examination (Forensic Expertology)*. 2nd ed. Moscow: Norma, INFRA-M; 2016. 367 p.
4. Omelyanyuk G. G., Usov A. I., Gulevskaya V. V., Savenko A. S. *Forensic Engineering Examinations: Study Guide*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Press; 2021. 52 p. ISBN 978-5-7038-5583-6.
5. Reiter R. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*. 1987;32(1):57-95. DOI: 10.1016/0004-3702(87)90062-2.
6. de Kleer J., Williams B. C. Diagnosing multiple faults. *Artificial Intelligence*. 1987;32(1):97-130. DOI: 10.1016/0004-3702(87)90063-4.
7. Korinek C. Methodology and Tools for Forensic Engineering Analysis of Electrical Shocks. *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*. 2023;40(1). DOI: 10.51501/jotnafe.v40i1.163.
8. Askar A. M., Alzarooni S. M., Habiballah M. M., Eissa R. M., Alremeithi R. H., Shah I. Diagnostic Forensic Tools in the Investigation of Electrocution Fatalities: A Case Study. *Analytical Science Advances*. 2025;6(2):e70032. DOI: 10.1002/ansa.70032.
9. Puhach I. I., Kharchenko V. V., Cheberyachko Yu. I. Self-Certainty Model for Expert Analysis of Causal Relationships in Forensic Mining Technical Examinations: Justification, Development, and Application. *Electrotechnical and Information Systems*. 2025;(108):172-182. DOI: 10.32782/EIS/2025-108-21.
10. Puhach I., Cheberiyachko Y., Kharchenko V., Puhach I. Restrictions on Application of Causal Modeling Methods in Forensic Mining and Technical Examination and Ways to their Overcoming. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*. 2026;43(2):136-156. DOI: 10.32353/khrife.2.2026.09.
11. Burnos A. A., Gulyaev A. V., Fokin D. S. Expertise in energy and electrical engineering. In: *Scientific, Technical and Economic Cooperation of Asia-Pacific Countries in the XXI Century: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Creative Youth (Khabarovsk, 14-17 April 2020)*. Vol. 2. Ed. A. R. Edigaryan. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University Press; 2020. P. 30-35.
12. Noon R. K. *Forensic Engineering Investigation*. Boca Raton: CRC Press; 2001. 488 p. ISBN 0-8493-0911-5.
13. *Rules for Electrical Installations*. 7th ed. Sections 1, 2, 3.
14. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 811 of 12 August 2022 On Approval of the Rules for Technical Operation of Consumers' Electrical Installations.

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

Черный С. П., Шушарин Н. С.
S. P. Cherny, N. S. Shusharin

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СРЕДЫ И ДИНАМИКИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

SIMULATION OF AN UNSTEADY ENVIRONMENT AND DYNAMICS OF AN UNDERWATER VEHICLE FOR A DYNAMIC POSITIONING 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: kepapu@knastu.ru.

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

Шушарин Никита Станиславович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: shusharin.nikita2016@yandex.ru.

Nikita S. Shusharin – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: shusharin.nikita2016@yandex.ru.

Аннотация. Современные подводные роботы при выполнении задач высокоточного позиционирования в прибрежных зонах сталкиваются с проблемой повышенного энергопотребления, обусловленной необходимостью постоянной борьбы с гидродинамическими возмущениями при сохранении фиксированной ориентации корпуса. Существующие подходы к имитационному моделированию часто используют упрощённые описания океанской среды, представляя течение исключительно в виде постоянного вектора возмущения, что снижает достоверность результатов оценки энергозатрат и точности позиционирования. В работе предложена комплексная математическая модель системы «подводный аппарат и океанская среда», учитывающая нелинейную зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от угла атаки и трёхкомпонентную структуру течений. Динамика аппарата описана уравнениями движения с шестью степенями свободы по методологии Фоссена. Океанское течение представлено суперпозицией фонового, приливного и турбулентного течений, причём турбулентная компонента моделируется коррелированным стохастическим процессом на основе дискретной схемы метода Эйлера. Параметры модели обоснованы натурными гидрологическими данными акватории Амурского залива. Проведённое имитационное моделирование в среде MATLAB подтвердило работоспособность разработанного математического аппарата и показало, что скорость течения изменяется в диапазоне 0.05...1.0 м/с при среднем значении 0.25...0.40 м/с. Разработанная модель служит базой для последующего синтеза адаптивных систем управления, обеспечивающих минимизацию энергозатрат при выполнении задач длительного мониторинга и инспекции подводных сооружений.

Summary. Modern underwater robots, when performing high-precision positioning tasks in coastal areas, face the problem of increased energy consumption due to the need to constantly combat hydrodynamic disturbances while maintaining a fixed hull orientation. Existing approaches to simulation modeling often use simplified descriptions of the ocean environment, presenting the current exclusively as a constant disturbance vector, which reduces the reliability of the results of energy consumption estimates and positioning accuracy. The paper proposes a complex mathematical model of the underwater vehicle and ocean environment system, which takes into account the nonlinear dependence of the coefficient of hydrodynamic resistance on the angle of attack and the three-component structure of currents. The dynamics of the apparatus is described by equations of motion with 6 degrees of freedom according to the Vossen methodology. The ocean current is represented by a superposition of background, tidal, and turbulent currents, and the turbulent component is modeled by a correlated stochastic process based on a discrete scheme of the Euler method. The model parameters are justified by natural hydrological data of the Amur Bay water area. The conducted simulation in the MATLAB environment confirmed the operability of the developed mathematical apparatus and showed that the flow velocity varies in the range from 0.05 to 1.0 m/s with an average value of 0.25-0.40 m/s. The developed model will serve as the basis for the subsequent synthesis of adaptive control sys-



tems that minimize energy consumption when performing tasks of long-term monitoring and inspection of underwater structures.

Ключевые слова: подводный аппарат, шесть степеней свободы, математическое моделирование, океанское течение, стохастический процесс, метод Эйлера, относительная скорость, адаптивное управление.

Key words: underwater vehicle, 6 degrees of freedom, mathematical modeling, ocean current, stochastic process, Euler's method, relative velocity, adaptive control.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0750110472 S724600 на 2024-2026 годы по теме «Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники».

УДК 629.5.016.5

Введение. Современные подводные роботы при выполнении задач высокоточного позиционирования в прибрежных зонах сталкиваются с проблемой повышенного энергопотребления [4]. Традиционные системы управления стремятся сохранять фиксированную ориентацию корпуса, одновременно противодействуя гидродинамическим возмущениям путём постоянной работы двигателей против вектора течения. Такой подход приводит к значительным затратам энергии, поскольку лобовое сопротивление корпуса при перпендикулярной ориентации к потоку достигает максимума. Непрерывная борьба с течениями вызывает колебания в позиционировании, снижая точность удержания заданной точки и делая невозможным выполнение задач, требующих стабильного зависания, таких как детальная фотофиксация участка морского дна или отбор проб грунта.

Существующие алгоритмы стабилизации не решают основную причину проблемы, поскольку работают в парадигме подавления возмущений, а не их компенсации через изменение ориентации корпуса. Перспективным направлением развития систем динамического позиционирования является стратегия адаптивной ориентации, при которой аппарат изменяет свои угловые координаты так, чтобы продольная ось ориентировалась соосно результирующему вектору гидродинамического потока, что позволяет минимизировать лобовое сопротивление.

Подводный аппарат рассматривается как объект управления, функционирующий под влиянием нестационарной среды, а именно случайных гидродинамических возмущений. Удержание заданной точки является задачей стабилизации координат и углов ориентации. Разработка модели объекта и среды необходима для последующего синтеза алгоритмов и законов управления [1–3].

Проблема управления подводными аппаратами в условиях течений подробно разработана в рамках классической модели с шестью степенями свободы [5; 7]. Однако при имитационном моделировании исследователи часто сталкиваются с недостаточной точностью описания океанской среды. Существующие модели часто либо игнорируют стохастическую природу турбулентности, либо используют упрощённые модели течений, представляя их исключительно в виде постоянного вектора возмущения. Такой подход не учитывает реальную недетерминированную структуру океанского потока, включающую фоновые, приливные и вихревые составляющие, что снижает достоверность результатов моделирования энергопотребления и точности позиционирования.

Целью данной работы является создание комплексной математической модели подводного аппарата и водной среды, учитывающей нелинейную зависимость гидродинамического сопротивления от угла атаки и трёхкомпонентную структуру течений. В качестве полигона для исследования выбрана акватория Амурского залива, характеризующаяся сложной гидрологической обстановкой.

Математическая модель подводного аппарата. Динамика подводного аппарата описывается системой уравнений движения с шестью степенями свободы, основанной на методологии Фоссена [5; 9; 10]. Основное уравнение движения в векторно-матричной форме имеет вид

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau,$$

где $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей в связанной системе координат корпуса.

Компоненты u, v, w соответствуют поступательным скоростям вдоль продольной, поперечной и вертикальной осей аппарата, а p, q, r задают угловые скорости крена, тангажа и рыскания соответственно. Положение и ориентация аппарата в инерциальной системе координат описываются вектором

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T,$$

где x, y, z – координаты центра масс, а ϕ, θ, ψ – углы Эйлера, определяющие ориентацию корпуса.

На рис. 1 представлена схема систем координат подводного аппарата в 6 степенях свободы с отображением всех описанных выше компонентов.

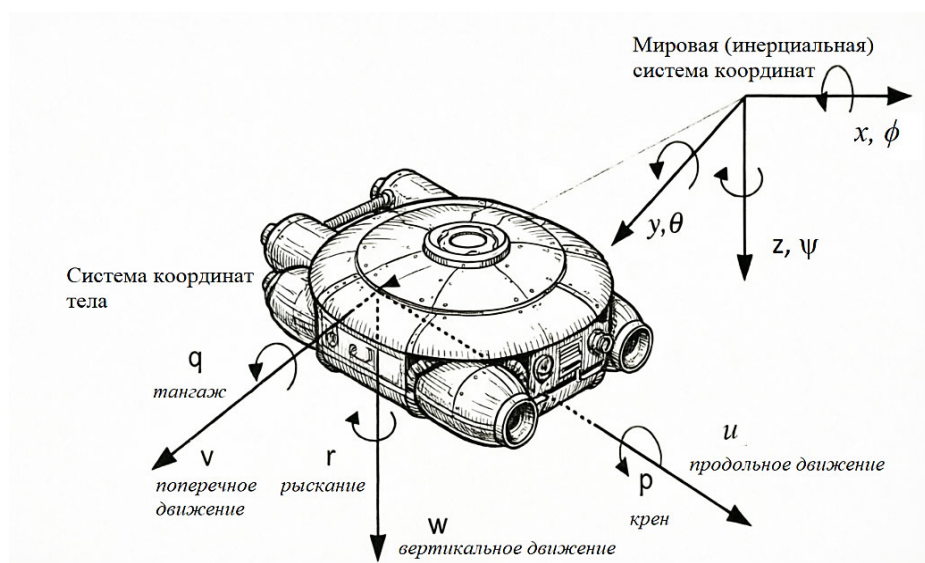


Рис. 1. Схема систем координат подводного аппарата в 6 степенях свободы

Матрица масс $M = M_{RB} + M_A$ объединяет массу аппарата и присоединённую массу воды, ускоряемой вместе с роботом. Данная матрица обеспечивает связь между приложенными силами и возникающими ускорениями, определяя инерционные свойства системы. Матрица $C(v)$ описывает силы Кориолиса и центробежные эффекты, зависящие от текущих скоростей аппарата. Указанные силы создают взаимное влияние между поступательными и угловыми скоростями, приводя к перекрёстным связям между степенями свободы.

Матрица гидродинамического демпфирования $D(v)$ включает как линейные компоненты, пропорциональные скорости, так и нелинейные компоненты, пропорциональные квадрату скорости. Данная матрица всегда направлена против движения и определяет сопротивление среды. Гидростатическая составляющая $g(\eta)$ учитывает вес аппарата и силу плавучести. При смещении центра тяжести относительно центра плавучести формируется восстанавливающий момент, действующий на угловые координаты даже при нулевых скоростях. Вектор управляющих сил и моментов $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ формируется двигателями аппарата.

Ключевым фактором, определяющим эффективность управления подводным аппаратом в условиях течений, является нелинейная зависимость коэффициента лобового сопротивления Cd от угла атаки α между продольной осью корпуса и вектором набегающего потока [6]. Нелинейная составляющая гидродинамического демпфирования описывается выражением

$$D_{NL}(\alpha) = 0.5 \cdot \rho \cdot Cd(\alpha) \cdot S \cdot |v_{rel}|^2,$$

где ρ – плотность морской воды; S – характерная площадь корпуса; v_{rel} – относительная скорость обтекания.

Для корпусов подводных аппаратов различной геометрии коэффициент сопротивления минимален при продольном обтекании ($\alpha \approx 0^\circ$) и достигает максимума при поперечном обтекании ($\alpha \approx 90^\circ$). При перпендикулярном обтекании угол атаки достигает максимальных значений, что приводит к резкому возрастанию лобового сопротивления и, как следствие, к значительному увеличению энергопотребления движителей для компенсации возмущающих воздействий.

Указанная физическая закономерность обосновывает необходимость разработки адаптивных стратегий управления, изменяющих ориентацию корпуса соосно вектору течения для минимизации гидродинамического сопротивления.

Математическая модель океанской среды. Полный вектор течения представляется как суперпозиция трёх физически различных компонент

$$V_c(t) = V_{mean} + V_{tide}(t) + V_{stoch}(t),$$

где V_{mean} является вектором фонового течения, $V_{tide}(t)$ описывает приливную составляющую, $V_{stoch}(t)$ представляет турбулентные пульсации скорости.

Фоновое течение

$$V_{mean} = [u_m, v_m, w_m]^T = \text{const}$$

формируется под влиянием крупномасштабных океанических циркуляционных систем, ветрового дрейфа и придонных стоковых потоков. На временных масштабах порядка десятков минут данная составляющая принимается квазистационарной.

Периодические течения. Периодическая составляющая включает несколько физически различных механизмов. Основным источником являются гравитационные приливы, вызванные воздействием Луны и Солнца, с характерными периодами 11–14 ч (полусуточные) и около 24 ч (суточные). Дополнительно возникают инерционные колебания с периодами 7–9 ч и 16–20 ч, обусловленные действием силы Кориолиса и взаимодействием потока с рельефом дна и береговой линией.

Периодическая компонента моделируется суммой гармонических колебаний:

$$V_{tide}(t) = A * \sin(\omega t + \phi),$$

где $A = [A_1, A_2, A_3]^T$ – вектор амплитуд гармоник; $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$ – вектор круговых частот, связанных с периодами приливов соотношением $\omega_i = \frac{2\pi}{T_i}$, здесь T_i – время, за которое совершается один полный цикл колебания; $\phi = [\phi_1, \phi_2, \phi_3]^T$ – вектор начальных фаз.

Турбулентная составляющая. Турбулентная компонента описывает мелкомасштабные вихревые структуры, возникающие при взаимодействии течений с дном, береговой линией и гидротехническими сооружениями, а также под влиянием ветрового воздействия. Турбулентные пульсации носят случайный, но коррелированный во времени характер, поскольку скорость течения не может измениться мгновенно из-за инерции водной среды.

Для моделирования турбулентной компоненты применяется дискретная схема на основе метода Эйлера-Маруямы, описываемая рекуррентным соотношением:

$$w_i(k) = w_i(k-1) * \left(1 - \frac{\Delta t}{T_{corr_i}}\right) + \sigma_i * \Delta t * \xi_i(k),$$

где $w_i(k)$ – значение стохастической компоненты по i -й оси в момент времени k ; $\xi_i(k) \sim N(0,1)$ – стандартная нормальная случайная величина; T_{corr_i} – время корреляции, характеризующее инерцию вихревых структур; σ_i – интенсивность случайных воздействий; Δt – шаг дискретизации.

Первое слагаемое описывает затухание возмущения и обеспечивает конечное время корреляции процесса, второе слагаемое имитирует приход нового вихря. Такой подход генерирует коррелированный случайный процесс, что соответствует физической природе прибрежной турбулентности.

Полный вектор течения. Формируется путём суперпозиции всех трёх компонент по каждой оси:

$$\mathbf{v}_c(t) = \begin{bmatrix} u_m \\ v_m \\ w_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ A_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2) \\ A_3 \sin(\omega_3 t + \phi_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \\ w_3(t) \end{bmatrix}.$$

Модуль полного течения, определяющий интенсивность возмущающего воздействия, вычисляется как

$$|\mathbf{V}_c(t)| = \sqrt{u_c^2(t) + v_c^2(t) + w_c^2(t)}.$$

Разработанная трёхкомпонентная модель воспроизводит физически различные механизмы формирования океанского течения и может быть использована как универсальный источник возмущений при имитационном моделировании подводных аппаратов.

Модель океанской среды интегрируется с моделью подводного аппарата через относительную скорость обтекания корпуса. Гидродинамические силы и моменты зависят не от абсолютной скорости аппарата в инерциальной системе координат, а от скорости потока воды относительно его корпуса. Если вектор скорости аппарата в связанной системе координат обозначить как $\mathbf{v}_c$, а вектор скорости течения, преобразованный в связанную систему координат, как $\mathbf{v}$, то относительная скорость обтекания определяется выражением $\mathbf{v}_{rel} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c$.

Данная относительная скорость является аргументом всех скоростно-зависимых матриц уравнения движения, включая матрицу гидродинамического демпфирования $D(\mathbf{v})$ и матрицу сил Кориолиса $C(\mathbf{v})$.

Таким образом, разработанная трёхкомпонентная модель течения служит входным сигналом для любой модели подводного аппарата для учёта течений и позволяет моделировать влияние недетерминированных океанских возмущений на динамику робота.

Программная реализация и результаты моделирования. В качестве объекта исследования выбрана акватория Амурского залива [13], относящегося к заливу Петра Великого Японского моря. Данный район характеризуется сложной гидрологической обстановкой, обусловленной взаимодействием крупномасштабных циркуляционных систем, приливных явлений и локальных вихревых процессов. Длина залива составляет около 65 км, ширина варьируется от 9 до 20 км, максимальная глубина достигает 50 м, что определяет специфику формирования гидродинамических возмущений.

Фоновое течение формируется под влиянием Приморского течения, движущегося вдоль западного побережья Японского моря, а также ветрового дрейфа и придонных стоковых потоков. Натурные измерения в Амурском заливе показывают [9], что летом в средней части акватории преобладают течения северного направления со скоростями до 42 см/с на горизонте 7 м, тогда как на нижнем горизонте 28 м наблюдаются течения западного и южного направлений со скоростями до 21 см/с.

Для целей моделирования приняты следующие значения компонент фонового течения: $u_m = 0.25$ м/с, $v_m = 0.15$ м/с, $w_m = 0.0$ м/с.

Приливное течение обусловлено гравитационным воздействием Луны и Солнца. В Японском море преобладают полусуточные приливные течения со скоростями 0.1-0.25 м/с в открытых районах. Высота приливов во Владивостоке составляет 0.2-0.4 м, а скорости приливо-отливных течений в прибрежных зонах достигают 0.2-0.5 м/с. В Амурском заливе зафиксированы максимальные скорости течений до 0.59 м/с летом и до 0.61 м/с осенью и зимой [13].

Приняты следующие параметры $A = [0.15; 0.08; 0.05]$ м/с, $T = [45\,000; 28\,800; 64\,800]$ с (12.5 ч, 8 ч, 18 ч), фазовые сдвиги $\phi = [0; 0; 0]$.

В заливе Петра Великого наблюдаются интенсивные вихревые процессы, возникающие при столкновении тёплых и холодных течений, а также на границах вод с разной температурой и солёностью. При сильных ветрах скорости течений могут достигать 0.7 м/с. Для моделирования турбулентной компоненты с помощью дискретной схемы на основе метода Эйлера-Маруямы приняты следующие значения: $\Delta t = 0.1$ с – шаг дискретизации, $T_{corr} = [20; 25; 15]$ – время корреляции, $\sigma = [0.08; 0.06; 0.02]$ м/с² – интенсивность шума.

Для анализа характеристик разработанной модели проведено имитационное моделирование на двух временных интервалах различной продолжительности. Первый интервал составляет 1200 с (20 мин), что позволяет детально рассмотреть динамику быстропротекающих процессов и оценить характер стохастических флуктуаций. Второй интервал продолжительностью 86 400 с (24 ч) даёт возможность наблюдать проявление приливных циклов и оценить долгосрочное поведение системы.

Результаты численного моделирования на коротком временном интервале представлены на рис. 2. Отсутствие резких скачков и наличие инерционных участков доказывают, что генерируемый сигнал не является белым шумом, а физически обоснованно имитирует поведение мелкомасштабных вихревых структур в прибрежной зоне.

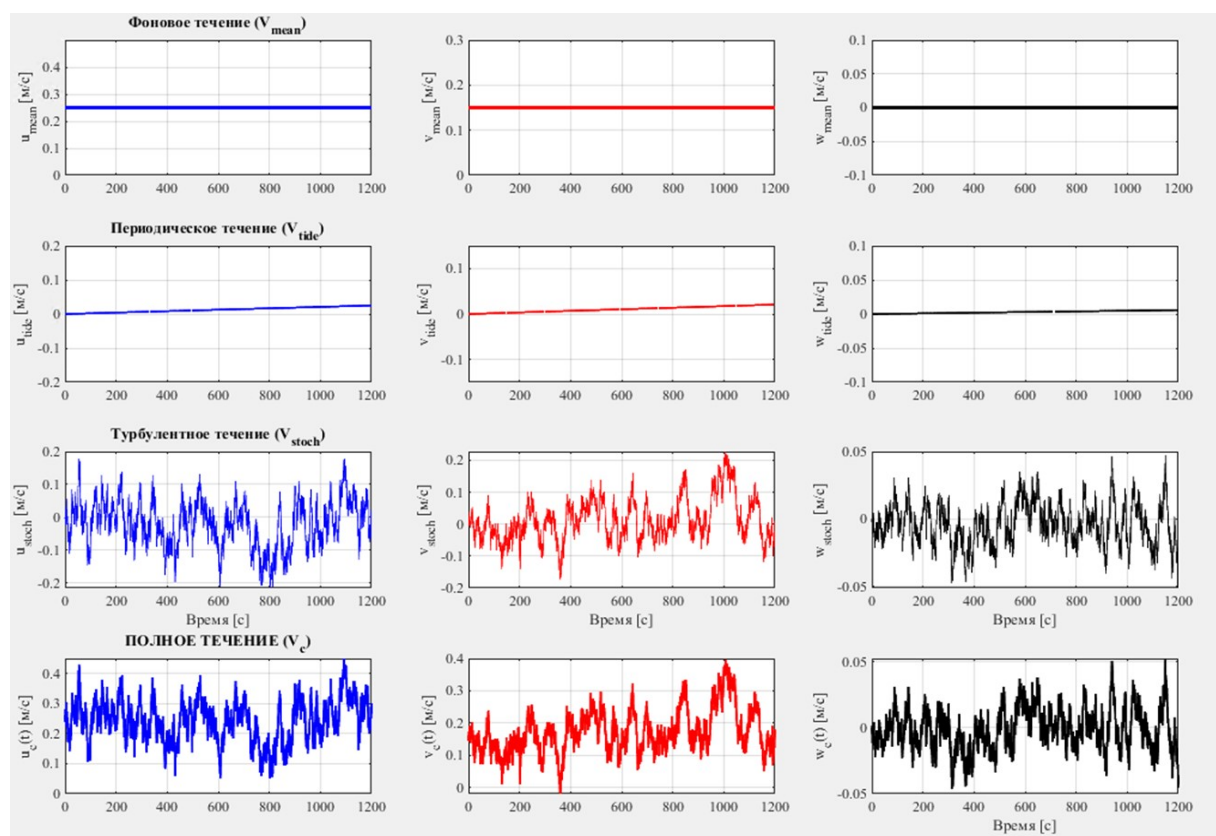


Рис. 2. Реализация компонент течения на интервале 20 мин

Результаты моделирования на суточном интервале представлены на рис. 3. На графиках отчетливо проявляются периодические составляющие с характерными периодами 8, 12.5 и 18 ч, соответствующими заданным гармоникам приливного течения. Длительное моделирование позволяет оценить вклад каждой компоненты в формирование полного вектора течения.

На рис. 4 представлены графики изменения модуля скорости течения для обоих временных интервалов. Суммарное влияние фонового, приливного и турбулентного течений формирует сложную недетерминированную структуру возмущений. Скорость течения изменяется в диапа-

зоне 0.05-0.70 м/с, при этом среднее значение составляет 0.25-0.40 м/с. Максимальные значения скорости, достигающие 1.0 м/с, возникают в моменты, когда все три компонента течения совпадают по направлению.

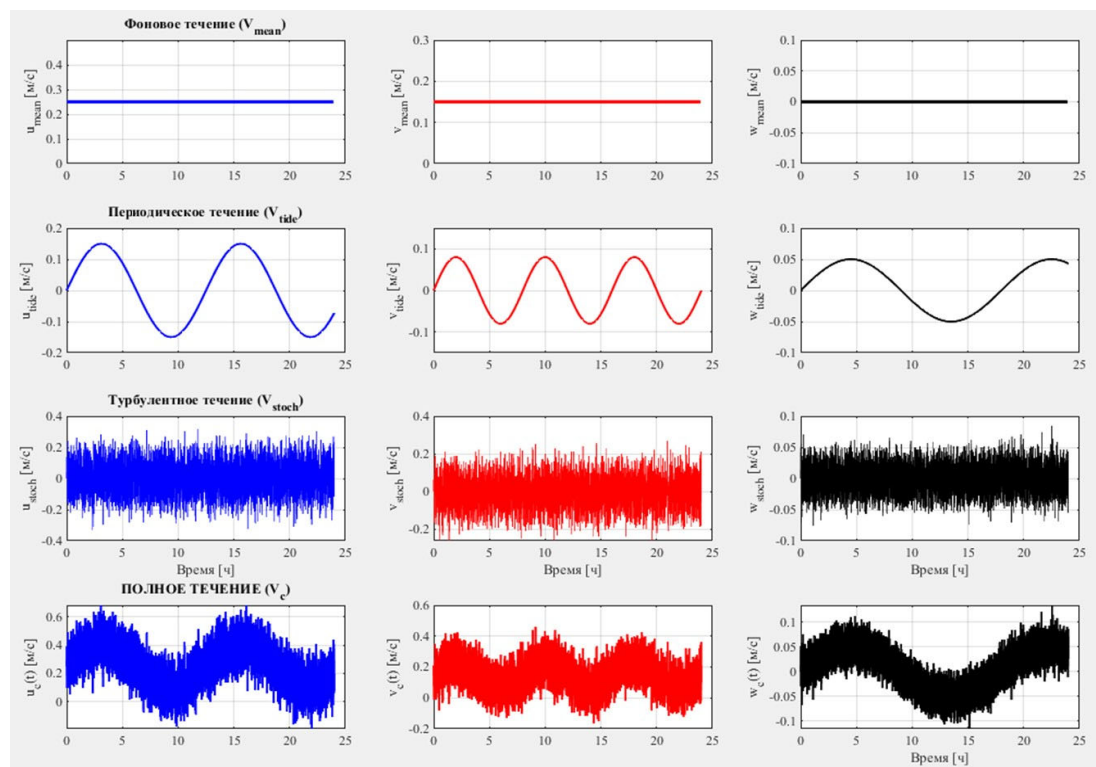


Рис. 3. Реализация компонент течения на интервале 24 ч

Полученный диапазон скоростей (0.05-1.0 м/с) является существенным гидродинамическим возмущением для подводных аппаратов, выполняющих задачи точного позиционирования. Средняя скорость течения 0.25-0.40 м/с создаёт постоянную нагрузку на систему управления, требующую непрерывной работы двигателей для удержания заданной позиции.

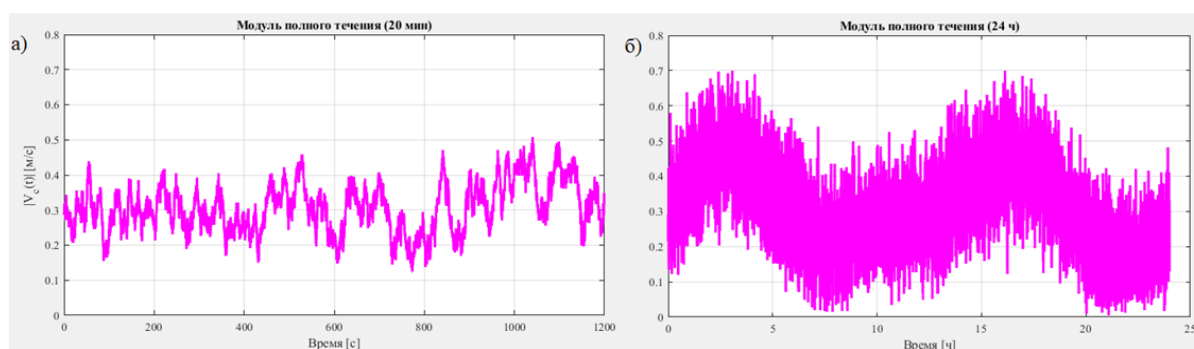


Рис. 4. Модуль полного вектора течения: а – интервал 20 мин; б – интервал 24 ч

Заключение. В результате проведённого исследования разработана комплексная математическая модель подводного аппарата и водной среды. Сформулированы уравнения движения подводного аппарата с шестью степенями свободы на основе методологии Фоссена, в которых учтена нелинейная зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от угла атаки. Обосновано, что минимизация данного угла является ключевым фактором снижения энергопотребления при удержании заданной точки в условиях внешних возмущений.



Разработана трёхкомпонентная математическая модель океанского течения, воспроизводящая физически различные механизмы формирования гидродинамических возмущений в акватории Амурского залива. Модель включает фоновую составляющую, гармонические приливные колебания и турбулентные вихри. Для моделирования турбулентной компоненты используется дискретный стохастический процесс, реализованный на основе дискретной схемы метода Эйлера, в котором каждое следующее значение зависит от предыдущего. Такой подход обеспечивает плавное изменение скоростей течений и описывает инерцию вихревых структур.

Проведённое имитационное моделирование в среде MATLAB подтвердило работоспособность предложенного математического аппарата. Полученные реализации вектора течения демонстрируют изменение скорости в диапазоне 0.05-1.0 м/с при среднем значении 0.25-0.40 м/с, что полностью соответствует натурным гидрологическим данным выбранной акватории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шушарин, Н. С. Моделирование движения подводного робота с использованием Aerospace Toolbox в MATLAB / Н. С. Шушарин, Р. Д. Григорец, Д. О. Савельев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных. В 3 ч., Комсомольск-на-Амуре, 10-14 апреля 2023 года. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2023. – С. 270-273.
2. Шушарин, Н. С. Подводный робот для проведения сварочных работ в тяжёлых условиях / Н. С. Шушарин, Д. О. Савельев // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных. В 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 05-11 декабря 2022 года. Ч. 1 / редколлегия: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2023. – С. 138-140.
3. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / S. P. Cherniy, V. I. Susdorf, A. V. Buzikaeva, V. N. Khrulkov // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. – 2021. – No. 31. – P. 4. – DOI 10.4108/eai.13-7-2018.165496.
4. 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. – DOI 10.17084/20764359-2023-71-66.
5. Garcia-Nava, S., García-Rangel, M.A., Zamora-Suárez, Á.E., Manzanilla-Magallanes, A., Muñoz, F., Lozano, R., Serrano-Almeida, A. Development of a 6 Degree of Freedom Unmanned Underwater Vehicle: Design, Construction and Real-Time Experiments, Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 11, 2023, 1744, <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/9/1744>.
6. Fossen, T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2011.
7. Mohamed, A., Kchaou, H., Abid, M. S., Driss, Z. Numerical Study of Attack's Angle Effect on Drag Coefficient of AUV Hull Design, American Journal of Mechanical Engineering, Vol. 5, No. 1, 2017, p. 8-13, <https://pubs.sciepub.com/ajme/5/1/2>.
8. Li, B., Su, T.-C. Dynamics of REMUS AUV in Ocean Current, Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, HI, USA, 2015, https://www.researchgate.net/publication/283882740_Dynamics_of_REMUS_AUV_in_ocean_current.
9. Du, X.-X., Wang, H., Hao, C.-Z., Li, X.-L. Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Unmanned Underwater Vehicle Moving Close to the Sea Bottom, Defence Technology, Vol. 10, No. 1, 2014, p. 76-81, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221491471400018X>.
10. cybergalactic. FossenHandbook: MATLAB/Octave Code for the Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control [Электронный ресурс]. – GitHub, 2024. – URL: <https://github.com/cybergalactic/FossenHandbook>.
11. Fossen, T. I. Marine Craft Model Documentation [Электронный ресурс]. – Fossen Research Group, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. – URL: <https://www.fossen.biz/html/marineCraftModel.html>.
12. Bewley, M., Friedman, A., Ferrari, R., Hill, N., Hovey, R., Barrett, N., Marzinelli, E. M., Pizarro, O., Figueira, W., Meyer, L., et al. Australian Sea-Floor Survey Data, with Images and Expert Annotations, Scientific Data, Vol. 2, 2015, 150057, <https://www.nature.com/articles/sdata201557>.

13. Храпченков, Ф. Ф. Изменчивость течений и температуры воды в Амурском заливе Японского моря в 2005-2007 гг. / Ф. Ф. Храпченков, Н. М. Безответных, И. И. Горин // Вестник ДВО РАН. – 2014. – № 5 (177). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenchivost-techeniy-i-temperatury-vody-v-amurskom-zalive-yaponskogo-morya-v-2005-2007-gg> (дата обращения: 20.06.2026). – Текст: электронный.

REFERENCES

1. Shusharin N. S., Grigorets R. D., Saveliev D. O. Modelirovanie dvizheniya podvodnogo robota s ispolzovaniem Aerospace Toolbox v Matlab [Modeling the Motion of an Underwater Robot Using Aerospace Toolbox in Matlab]. Molodezh i nauka: aktualnye problemy fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy : Materialy VI Vserossiyskoy natsionalnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh. V 3-kh chastyakh [Youth and Science: Current Problems of Fundamental and Applied Research: Proceedings of the VI All-Russian National Scientific Conference of Young Scientists. In 3 Parts], Komsomolsk-on-Amur, April 10–14, 2023, Part 1, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure gosudarstvennyy universitet Publ., 2023, pp. 270-273. (In Russian). EDN XUHNW.
2. Shusharin N. S., Saveliev D. O. Podvodnyy robot dlya provedeniya svarochnykh rabot v tyazhelykh usloviyakh [Underwater Robot for Welding Operations in Harsh Conditions]. Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu : Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh. V 2-kh chastyakh [Production Technologies of the Future: from Creation to Implementation: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists. In 2 Parts], Komsomolsk-on-Amur, December 5–11, 2022, Part 1, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure gosudarstvennyy universitet Publ., 2023, pp. 138-140. (In Russian). EDN BFXAVE.
3. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / S. P. Cherniy, V. I. Susdorf, A. V. Buzikaeva, V. N. Khrulkov // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. – 2021. – No. 31. – P. 4. – DOI 10.4108/eai.13-7-2018.165496. – EDN RVZZPA.
4. Lyamin M. A., Chernyy S. P. Sistema sovместного управления электроприводами мотор-колёс робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов [System of Combined Control of Motor-Wheel Electric Drives of a Robotic Transport Complex for Main Pipelines]. Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University], 2023, no. 7(71), pp. 66-73. doi: 10.17084/20764359-2023-71-66. EDN GESP NF. (In Russian).
5. Garcia-Nava S., García-Rangel M. A., Zamora-Suárez Á. E., Manzanilla-Magallanes A., Muñoz F., Lozano R., Serrano-Almeida A. Development of a 6 Degree of Freedom Unmanned Underwater Vehicle: Design, Construction and Real-Time Experiments. Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 11, 2023, 1744. Available at: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/9/1744>.
6. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, 2011.
7. Mohamed A., Kchaou H., Abid M. S., Driss Z. Numerical Study of Attack's Angle Effect on Drag Coefficient of AUV Hull Design. American Journal of Mechanical Engineering, Vol. 5, No. 1, 2017, pp. 8-13. Available at: <https://pubs.sciepub.com/ajme/5/1/2>.
8. Li B., Su T.-C. Dynamics of REMUS AUV in Ocean Current. Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, HI, USA, 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/283882740_Dynamics_of_REMUS_AUV_in_ocean_current.
9. Du X.-X., Wang H., Hao C.-Z., Li X.-L. Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Unmanned Underwater Vehicle Moving Close to the Sea Bottom. Defence Technology, Vol. 10, No. 1, 2014, pp. 76-81. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221491471400018X>.
10. cybergalactic. FossenHandbook: MATLAB/Octave Code for the Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. GitHub, 2024. Available at: <https://github.com/cybergalactic/FossenHandbook> (accessed 20 June 2026).
11. Fossen T. I. Marine Craft Model Documentation. Fossen Research Group, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. Available at: <https://www.fossen.biz/html/marineCraftModel.html> (accessed 20 June 2026).
12. Bewley M., Friedman A., Ferrari R., Hill N., Hovey R., Barrett N., Marzinelli E. M., Pizarro O., Figueira W., Meyer L., et al. Australian Sea-Floor Survey Data, with Images and Expert Annotations. Scientific Data, Vol. 2, 2015, 150057. Available at: <https://www.nature.com/articles/sdata201557>.
13. Khrapchenkov F. F., Bezotvetnykh N. M., Gorin I. I. Izmenchivost techeniy i temperatury vody v Amurskom zalive Yaponskogo morya v 2005-2007 gg. [Variability of Currents and Water Temperature in Amur Bay of the Sea of Japan in 2005-2007]. Vestnik DVO RAN [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], 2014, no. 5 (177). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenchivost-techeniy-i-temperatury-vody-v-amurskom-zalive-yaponskogo-morya-v-2005-2007-gg> (accessed 20 June 2026).



Ворощенко В. Д., Биткина А. А., Иванкова Е. П.
V. D. Voroshchenko, A. A. Bitkina, E. P. Ivankova

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВНУТРИЗАВОДСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

AUTOMATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF AIRCRAFT IN-PLANT TRANSPORTATION

Ворощенко Василий Данилович – аспирант, инженер-технолог Научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: v.voroshchenko@yandex.ru.

Vasily D. Voroshchenko – Postgraduate Student, Engineer-Technologist, Scientific and Educational Center «Industrial Robotics and Advanced Industrial Technologies», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: v.voroshchenko@yandex.ru.

Биткина Анастасия Александровна – старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bitkinaanastasia02@gmail.com.

Anastasia A. Bitkina – Senior Lecturer, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bitkinaanastasia02@gmail.com.

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

Аннотация. В статье рассматривается задача автоматизации технологического процесса внутризаводской транспортировки воздушных судов в условиях мелкосерийного авиастроительного производства. На примере транспортировки воздушного судна к месту проведения девиационных работ проанализирован существующий процесс и выявлены ограничения, связанные с ручным управлением, отсутствием обратной связи по положению при коррекции курса на девиационной площадке и необходимостью привлечения персонала для подготовительных операций. Предложено применение роботизированного тягача с бесштанговым захватом передней опоры шасси и управлением движением по заданной траектории. Для повышения точности конечного позиционирования предусмотрены интеграция тягача с системой измерения курса воздушного судна и реализация замкнутого контура коррекции. Формализовано условие завершения коррекции на основе ошибки курса и заданного допуска. Проведена количественная оценка параметров предлагаемого процесса. Установлено, что скорость коррекции тягачом превышает скорость девиационной платформы. Разработан алгоритм автоматической коррекции курса воздушного судна, предусматривающий формирование ошибки относительно заданного направления, выработку управляющего воздействия и последовательное выполнение корректирующих перемещений до достижения установленного допуска. Предложенный алгоритм позволяет повысить степень автоматизации, сократить подготовительные операции и участие персонала в управлении движением, повысить повторяемость позиционирования и сократить время подготовки воздушного судна к девиационным работам.

Summary. This article examines the automation of the in-plant aircraft transportation process in a small-scale aircraft manufacturing environment. Using the example of aircraft transportation to the deviation site, the existing process is analyzed and limitations associated with manual control, the lack of position feedback during course corrections on the deviation platform, and the need for personnel for preparatory operations are identified. The use of a robotic tractor with a barless grip on the front landing gear support and control of movement along a predetermined trajectory is proposed. To improve final positioning accuracy, the tow vehicle is integrated with the aircraft heading measurement system and a closed-loop correction loop is implemented. The correction completion condition is formalized based on the course error and a specified tolerance. A quantitative assessment of the parameters of the

proposed process is conducted. It is established that the tow vehicle's correction speed exceeds the speed of the deviation platform. An algorithm for automatic correction of the aircraft's heading has been developed, which involves generating an error relative to the specified direction, generating a control action, and sequentially performing corrective movements until the established tolerance is reached. The proposed algorithm makes it possible to increase the degree of automation, reduce preparatory operations and the involvement of personnel in movement control, improve positioning repeatability, and reduce the time required to prepare the aircraft for deviation work.

Ключевые слова: автоматизация технологического процесса, девиационные работы, автоматизированная система управления, коррекция курса воздушного судна, позиционирование, роботизированный тягач, технологические операции.

Key words: automation of technological processes, deviation work, automated control system, aircraft course correction, positioning, robotic tractor, technological operations.

Исследование выполнено 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».

УДК 681.5:629.73

Введение. Современные тенденции развития авиастроительной отрасли характеризуются стремлением предприятий к наращиванию объёмов выпуска воздушных судов при сохранении качества. В условиях мелкосерийного производства увеличение производственного потока выявляет ограничения в технологической цепочке, которые при малом объёме выпуска не проявляли себя [1].

Одним из таких ограничений является процесс внутризаводской транспортировки воздушных судов между производственными участками. На протяжении жизненного цикла сборки самолёт неоднократно перемещается от участка к участку: в процессе агрегатной и окончательной сборки, при переводе на лётно-испытательную станцию, при подготовке к специализированным работам. Аналогичным образом между участками перемещаются сборочные стапели и технологическая оснастка. В настоящее время эти операции выполняет персонал с помощью тягачей, управляемых человеком, или путём ручного перемещения оснастки. При существующем темпе выпуска такой подход себя оправдывает, однако при его увеличении стабильность транспортных операций становится фактором, определяющим ритм всего производства.

Особое значение в данном контексте имеет процесс транспортировки воздушного судна (ВС) к месту проведения девиационных работ, а именно комплекса регламентных операций по компенсации девиации магнитного компаса, выполняемых на площадке для девиационных работ. Девиационные работы относятся к финальным этапам производственного цикла и предъявляют жёсткие требования к исходному положению ВС: самолёт должен быть установлен в строго определённую позицию относительно магнитного севера. Некорректная транспортировка влечёт необходимость перепозиционирования непосредственно на площадке, что увеличивает продолжительность девиационных работ и при возрастании производственного потока формирует дополнительные потери времени на финальной стадии сборочного цикла.

В качестве решения, направленного на устранение указанных ограничений, рассматривается применение роботизированного тягача, а именно автономного транспортного средства с бесштанговым захватом передней опоры шасси [2]. Целью работы является обоснование целесообразности совмещения технологических операций транспортировки воздушного судна и коррекции его курса относительно магнитного севера в едином контуре управления роботизированным тягачом взамен раздельного выполнения данных операций тягачом и девиационной платформой.

Достижение данной цели требует, в первую очередь, анализа технологического процесса транспортировки воздушного судна и обоснования применимости роботизированного тягача взамен пилотируемого штангового тягача в условиях рассматриваемого производства.

Текущий процесс транспортировки воздушного судна. Технологический процесс (ТП) транспортировки ВС инициируется командой о проведении девиационных работ и включает последовательность технологических операций (ТО) по перемещению ВС от цеха окончательной сборки или стоянки до девиационной площадки с последующим позиционированием в требуемое исходное положение. К началу транспортировки ВС находится на открытой площадке возле цеха окончательной сборки или на стоянке. ТП включает следующие ТО:

1. подача тягача к месту хранения буксировочной штанги, соответствующей типу ВС, и получение штанги;
 2. подача тягача к ВС и присоединение штанги к передней опоре шасси и к тягачу. ТО выполняется оператором тягача совместно с двумя работниками цеха или стоянки;
 3. буксировка ВС по специализированной буксировочной дороге до девиационной площадки;
 4. позиционирование ВС на девиационной площадке: левое заднее колесо основной опоры шасси устанавливается в очерченный центр площадки, курс ВС выдерживается приблизительно в направлении магнитного севера; точная ориентация относительно магнитного севера обеспечивается позднее, в ходе девиационных работ;
 5. отсоединение штанги персоналом площадки и убытие тягача.
- Функциональная модель ТП представлена на рис. 1.

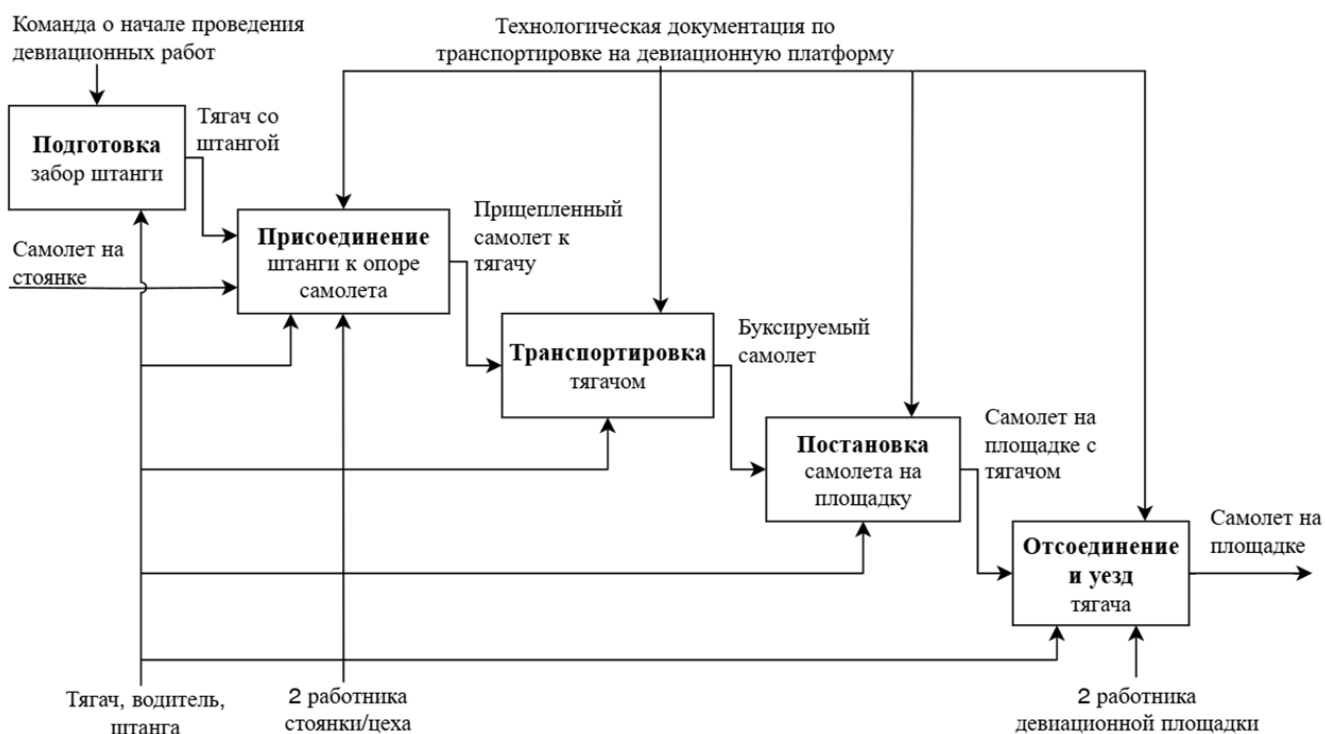


Рис. 1. Функциональная модель текущего технологического процесса транспортировки воздушного судна

В соответствии с функциональной моделью входом ТП является ВС, находящееся на стоянке, выходом является ВС, позиционированное на девиационной площадке в требуемом исходном положении. Управляющим воздействием выступает технологическая документация, регламентирующая порядок выполнения ТО и допустимые режимы буксировки. Механизмами ТП являются штанговый тягач, буксировочная штанга и задействованные операторы.

Буксировочная дорога представляет собой полосу с расчищенным по обе стороны пространством, обеспечивающим беспрепятственный проход ВС с учётом размаха крыла. Дорожное покрытие имеет неровности в виде волн и локальных просадок, которые для применяемой техники

не являются критичными, однако выступают источником возмущающих воздействий при движении. Скорость буксировки составляет до 20 км/ч. Девиационная площадка расположена на открытом воздухе вровень с дорожным полотном, её радиус составляет до 25 м.

Непосредственно в выполнении ТП задействованы три человека, а именно оператор тягача и два работника цеха окончательной сборки или стоянки. Персонал девиационной площадки участвует в отсоединении штанги по завершении транспортировки, однако его присутствие на площадке не обусловлено ТП транспортировки.

Анализ ограничений текущего процесса. Ключевым ограничением рассматриваемого ТП является недостаточная повторяемость позиционирования ВС на девиационной площадке. Операция выполняется в режиме ручного управления: оператор ориентируется по визуальной оценке, инструментальный контроль положения ВС и обратная связь по координатам в контуре управления отсутствуют. Вследствие этого точность позиционирования в каждом цикле ТП определяется квалификацией и текущим состоянием оператора и варьируется от цикла к циклу. При росте нагрузки на ТП и операторов вероятность отклонений от требуемого положения повышается, что увеличивает объём корректирующих операций на площадке и продолжительность подготовки к девиационным работам.

Вторым источником нестабильности являются возмущающие воздействия. Открытое расположение буксировочной дороги и площадки обуславливает подверженность процесса ветровым нагрузкам, а неровности покрытия создают переменные динамические нагрузки на систему из тягача и буксируемого ВС. При ручном управлении компенсацию возмущений выполняет оператор, однако точность такой компенсации ограничена: при невысокой частоте циклов опытный оператор отрабатывает возмущения удовлетворительно, но при возрастании нагрузки в каждом цикле качество ручного регулирования снижается и отклонения накапливаются.

Отдельным ограничением является штанговая технология сцепки, увеличивающая трудоёмкость подготовительных ТО и требующая участия трёх человек. Данное ограничение не носит принципиального характера, поскольку устранимо заменой штангового тягача на бесштанговый без изменения структуры остальных ТО.

Роботизированный тягач как средство автоматизации процесса транспортировки. В качестве основы для автоматизации целесообразно рассматривать роботизированный тягач Mototok SPACER 200, представляющий собой полностью электрический дистанционно управляемый бесштанговый буксировщик грузоподъёмностью до 200 т, который по опции оснащается модулем автономного вождения [3]. В пользу данной модели говорит и то, что тягач того же класса уже эксплуатируется на предприятии для перемещений внутри цеха. Персонал знаком с техникой производителя, что снижает риски освоения нового оборудования.

Электрический привод тягача определяет необходимость планирования его энергопотребления при эксплуатации в режиме транспортировки, для чего могут применяться модели прогнозирования на основе нейро-нечётких методов [4].

Сцепка с ВС реализуется бесштанговым способом, а именно: платформа тягача подводится под переднюю опору шасси и фиксирует её гидравлическим механизмом захвата. Захват выполняется в автоматическом режиме по команде оператора за время не более 15 с, что сокращает продолжительность подготовительных ТО по сравнению со штанговой технологией и исключает операции хранения и подачи штанги.

Система управления движением тягача реализует следование по направляющей линии, нанесённой на дорожное покрытие: бортовая камера непрерывно отслеживает линию, а регулирование траектории выполняется по отклонению от неё. Маркеры, размещённые в ключевых точках маршрута, задают операционные команды: изменение скорости, остановку, поворот на развилке. Точность следования по заданной траектории составляет единицы миллиметров. Программа маршрута задаётся однократно при вводе системы в эксплуатацию и воспроизводится в каждом цикле ТП без отклонений. Тягачи данного класса эксплуатируются в аэропортах при существенно большей интенсивности операций и на более протяжённых маршрутах, что подтверждает применимость данного решения в условиях внутризаводской транспортировки [5; 6].



Ограничения роботизированного тягача и их применимость к условиям предприятия.

Роботизированный тягач имеет собственные ограничения, каждое из которых следует оценить применительно к рассматриваемому ТП. Таких ограничений три, и ни одно в условиях предприятия не является критичным (см. табл. 1).

Таблица 1

Ограничения роботизированного тягача и их оценка в условиях предприятия

Ограничение	Оценка в условиях предприятия
Пониженная скорость буксировки	В автономном режиме скорость ниже допустимых 20 км/ч. Однако ТП транспортировки к девиационной площадке не определяет темп производства: значение имеет не скорость движения, а точность и повторяемость позиционирования. При мелкосерийном выпуске частота циклов к скорости тягача нетребовательна
Зависимость от разметки маршрута	Изменение маршрута требует перенанесения направляющей линии. Однако маршруты между участками стабильны, расположение участков и площадки задано инфраструктурой предприятия и практически не меняется, а номенклатура ВС фиксирована. Разметка наносится однократно и эксплуатируется длительное время
Остаточная погрешность положения самолёта	При подходе тягача к колесу и захвате возникает угловое отклонение курса ВС, обусловленное разбросом положения тягача в момент начала захвата. Конструкция прижимает колесо к упору и фиксирует его, исключая смещение в процессе движения, однако остаточная погрешность конечного положения в единицы сантиметров сопоставима с допусками девиационных работ и требует компенсации.

Таким образом, решения требует только последнее ограничение, а именно остаточная погрешность конечного положения ВС, что определяет необходимость контура коррекции положения.

Функциональная модель ТП транспортировки при его автоматизации на базе роботизированного тягача представлена на рис. 2. В структуру модели вводится автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП), формирующая операционные команды роботу: команды на движение, захват опоры шасси, транспортировку и отсоединение [7]. Оператор исключается из контура непрерывного управления движением: регулирование траектории и скорости выполняется бортовой системой управления тягача по данным сенсорики в соответствии с направляющей линией и маркерами разметки, вследствие чего постоянный контроль оператором параметров движения не требуется. За оператором сохраняются функции наблюдения за ходом ТП и подтверждения переходов между ТО. Построение АСУТП по принципу формирования управляющих команд для роботизированного технологического оборудования согласуется с подходами, применяемыми при разработке систем поддержки принятия решений для оптимизации иных роботизированных технологических процессов [8].

Переход от исходного ТП к автоматизированному выражается в следующих эффектах:

1. сокращение числа операторов, задействованных в контуре ТП;
2. исключение ТО, связанных со штангой и её содержанием;
3. повышение повторяемости позиционирования ВС;
4. снижение вероятности отклонений, обусловленных субъективными факторами оператора;
5. сокращение времени подготовки к девиационным работам.

Негативным эффектом является снижение скорости транспортировки ВС, которое, как показано в табл. 1, в условиях рассматриваемого ТП не является критичным.

Автоматизированная коррекция курса воздушного судна на девиационной площадке.

Применение роботизированного тягача открывает возможность получения дополнительного эффекта на стыке ТП транспортировки и девиационных работ, связанного с автоматизацией коррекции положения ВС относительно магнитного севера.

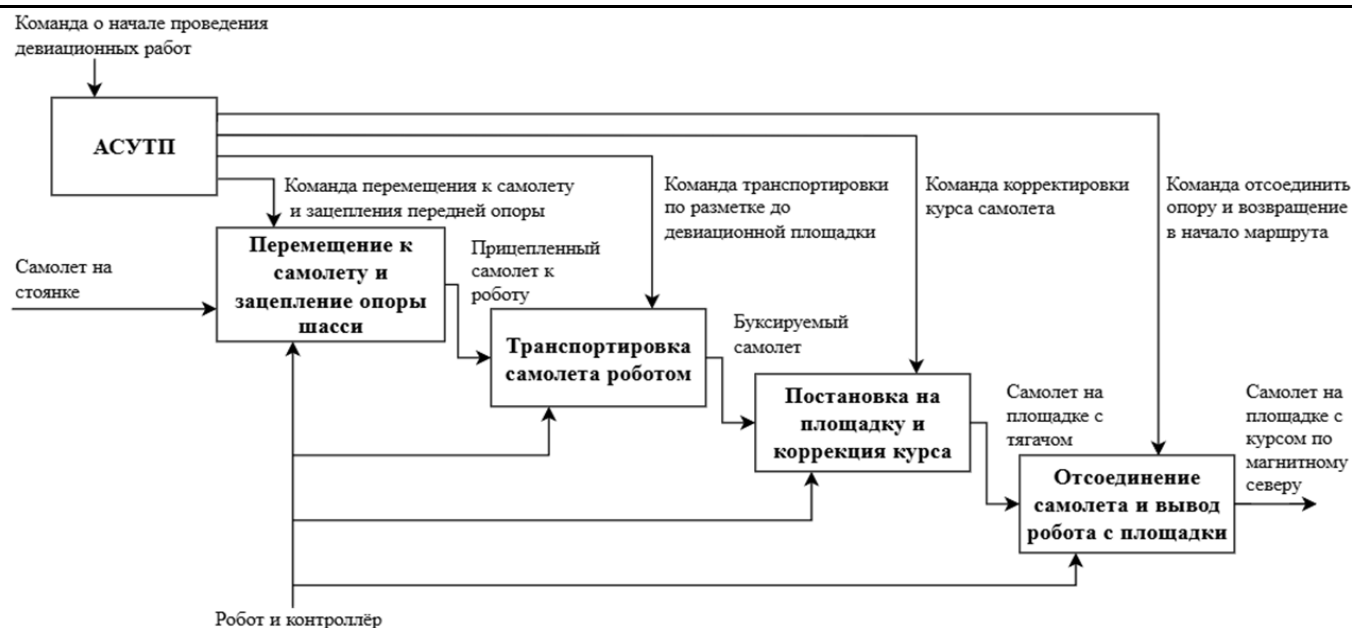


Рис. 2. Функциональная модель автоматизированного технологического процесса транспортировки воздушного судна

В исходном виде ТП после доставки ВС на площадку переднее шасси устанавливается на специализированную девиационную платформу, которая подключается по проводному каналу связи к расположенной на ВС системе измерения курса. Оператор задаёт параметры коррекции, платформа доворачивает ВС в направлении магнитного севера в пределах допусков, после чего начинаются девиационные работы. Скорость движения платформы составляет до 0,5 км/ч.

Предлагаемый подход предусматривает выполнение коррекции курса роботизированным тягачом до установки ВС на платформу. Датчик системы измерения курса подключается к тягачу по проводному каналу связи, и после доставки ВС на площадку тягач, удерживая переднюю опору шасси в захвате, выполняет позиционирование ВС в направлении магнитного севера в замкнутом контуре управления с обратной связью по курсу. Коррекция выполняется итерационно до достижения заданных допусков, после чего тягач отсоединяется и девиационные работы могут быть начаты. Скорость движения тягача при коррекции составляет до 5 км/ч, что на порядок выше скорости девиационной платформы, за счёт чего время операции коррекции сокращается. Замкнутый контур по курсу обеспечивает достижение требуемого положения независимо от остаточной погрешности доставки, обусловленной как разбросом положения тягача при захвате, так и геометрическими отклонениями конкретного ВС в пределах производственных допусков.

Следует отметить, что девиационная платформа спроектирована под задачи девиационных работ, что определяет два её конструктивных свойства: малую скорость движения и отсутствие возмущающих электромагнитных полей от привода. Роботизированный тягач обеспечивает существенно большую скорость перемещения, однако создаёт электромагнитное поле, при котором проведение девиационных работ недопустимо. По этой причине тягач не может заменить платформу в самих девиационных работах, поэтому его применение ограничивается этапом предварительной коррекции курса до их начала.

Последовательности операций исходного и предлагаемого вариантов ТП сопоставлены на рис. 3. В исходном варианте коррекция курса выполняется девиационной платформой и требует предварительных ТО установки шасси на платформу, подключения системы измерения курса и задания параметров коррекции. В предлагаемом варианте коррекция выполняется тягачом непосредственно после доставки, при этом цикл коррекции повторяется до входа курса в заданный допуск, а перечисленные подготовительные ТО исключаются.

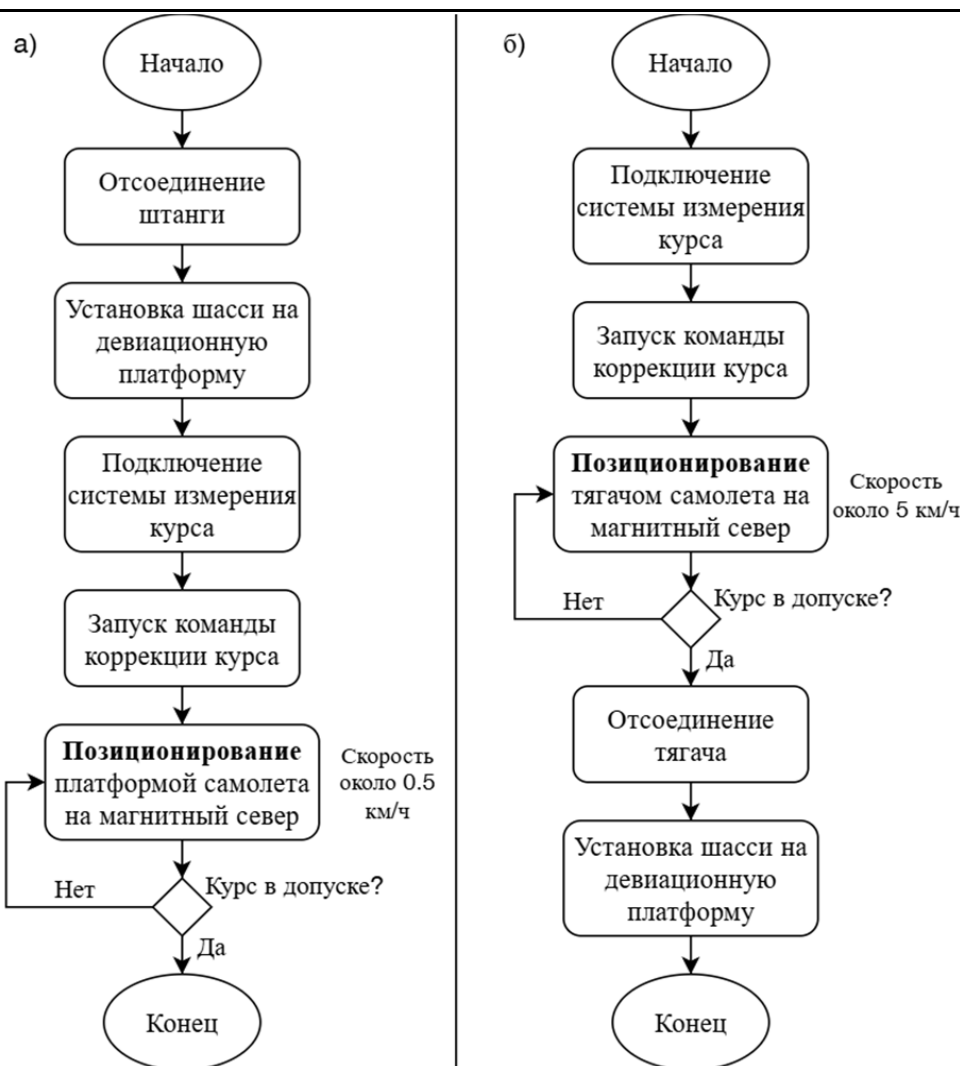


Рис. 3. Последовательность операций исходного и предлагаемого процессов финального позиционирования

Таким образом, последовательность действий участников автоматизированного ТП транспортировки можно представить в виде диаграммы активности (см. рис. 4).

Участниками процесса являются АСУТП, роботизированный тягач и оператор. АСУТП формирует команду на движение к ВС, после чего тягач перемещается по направляющей разметке к месту стоянки. Прибытие тягача фиксирует оператор и подаёт сигнал на выполнение следующей операции, по которому АСУТП формирует команду на захват передней опоры шасси. По готовности захвата АСУТП выдаёт команду на транспортировку ВС по разметке к девиационной площадке; на протяжении маршрута оператор осуществляет наблюдение за перемещением. По прибытии ВС в назначенную точку оператор подключает к тягачу систему измерения курса и запускает операцию коррекции курса на магнитный север. По завершении коррекции АСУТП формирует команду на отсоединение ВС и убытие тягача на стоянку.

В качестве базовой модели замкнутого контура коррекции принят ПИД-регулятор, формирующий управляющее воздействие на основе ошибки курса, её интегральной и дифференциальной составляющих. Выбор ПИД-регулятора обусловлен высокой инерцией и нелинейной динамикой объекта управления. Данная структура рассматривается как исходная и может быть изменена в процессе дальнейшей разработки и экспериментальной проверки. Ошибка курса определяется формулой

$$e_{\psi}(t) = \psi_{ref} - \psi(t),$$

где ψ_{ref} – задаваемый курс, град; $\psi(t)$ – измеренный курс, град.

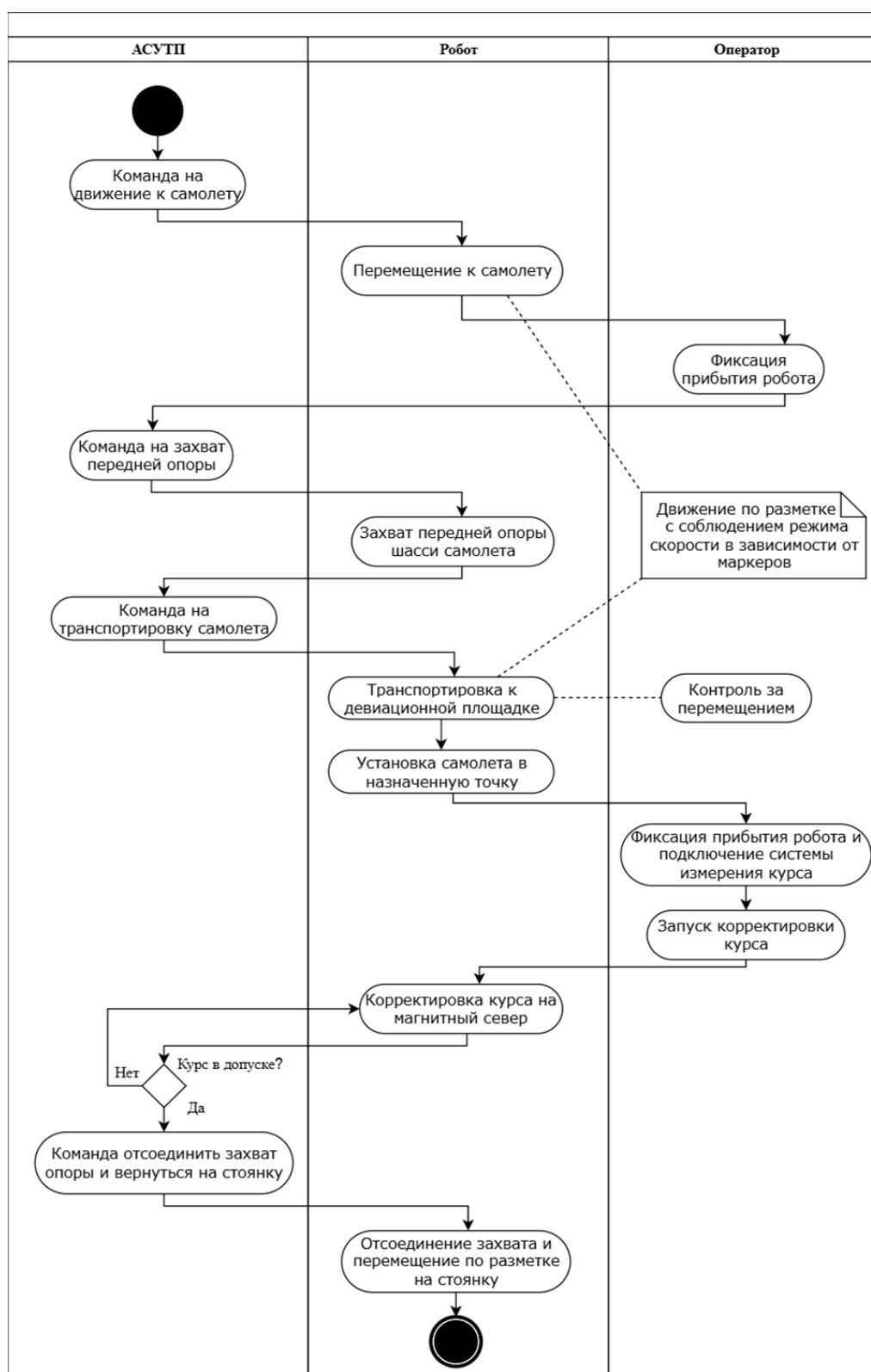


Рис. 4. Диаграмма активности автоматизированного технологического процесса транспортировки воздушного судна

Тогда управляющее воздействие рассчитывается так:

$$U(t) = K_P \cdot e_\psi(t) + K_I \int_0^t e_\psi(\tau) d\tau + K_D \frac{de_\psi(t)}{dt},$$

где K_P – это пропорциональный коэффициент; K_I – интегральный коэффициент; K_D – дифференциальный коэффициент.

Коррекция завершается при достижении ошибки курса значения, не превышающего допустимый уровень:

$$|e_\psi| \leq \varepsilon_\psi,$$

где ε_ψ – допустимая ошибка по курсу ВС, град.

Таким образом, реализация системы управления роботизированным тягачом с навигацией по направляющей разметке и замкнутым контуром коррекции курса по обратной связи от системы измерения курса обеспечивает выполнение технологических требований к позиционированию ВС при одновременном сокращении подготовительных операций и времени подготовки к девиационным работам. Это подтверждает целесообразность автоматизации ТП транспортировки воздушных судов на базе роботизированного тягача в условиях рассматриваемого производства.

Заключение. В статье рассмотрена проблема неустойчивости процесса внутривоздушной транспортировки воздушных судов как фактора, ограничивающего рост объема выпуска в условиях мелкосерийного авиастроительного производства. Показано, что роботизированный тягач с бесштанговым захватом передней опоры шасси обеспечивает повторяемость транспортного цикла, компенсацию внешних возмущающих воздействий и сокращение численности персонала, а выявленные ограничения данного класса техники не носят критического характера применительно к условиям предприятия со стабильной производственной инфраструктурой.

Научная новизна исследования состоит в обосновании целесообразности совмещения технологической операции транспортировки ВС с операцией коррекции курса относительно магнитного севера в едином контуре управления с обратной связью, реализуемой непосредственно роботизированным тягачом, что позволяет заменить применяемую для этой цели девиационную платформу и сократить время подготовки к девиационным работам.

Результаты исследования могут служить основой для технического проектирования системы роботизированной транспортировки воздушных судов и разработки алгоритмов управления тягачом в режиме позиционирования по обратной связи от системы измерения курса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальные исследования алгоритмов планирования движений коллаборативных роботов в автоматизированных технологических комплексах / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. Д. Ворощенко, Е. П. Иванкова // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4. – Ч. 3. – С. 66-75.
2. Vis I. F. A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems // European Journal of Operational Research. 2006. Vol. 170, No. 3. P. 677-709. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.09.020.
3. Zoutendijk M., Mitici M., Hoekstra J. An investigation of operational management solutions and challenges for electric taxiing of aircraft // Research in Transportation Business and Management. 2023. Vol. 49. Art. 101019. DOI: 10.1016/j.rtbm.2023.101019.
4. Design of Intelligent Decision Support System for Robotized Welding Technological Processes Optimization / A. Y. Efimov, M. A. Gorkavy, V. P. Egorova, D. B. Solovlev // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01-04 октября 2019 года. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8933908. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8933908.
5. Zheng Z., Lu Y. Research on AGV trackless guidance technology based on the global vision // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2022. Vol. 19, No. 4. DOI: 10.1177/00368504221103766.
6. Kim J., Cho S. Development of Vision-Based Autonomous Tug and Towing System // AIAA Aviation Forum and ASCEND. 2024. DOI: 10.2514/6.2024-3743.
7. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, В. А. Соловьев [и др.] // Учёные записки

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 40-46.

8. Efimov, A. Predicting power consumption of robotic complex based on neuro-fuzzy system / A. Efimov, M. Gorkavyy, A. Gorkavyy // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18-22 мая 2020 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9112066. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.911206.

REFERENCES

1. Gorkavyy M.A., Melnichenko M.A., Voroshchenko V.D., Ivankova E.P. Eksperimentalnye issledovaniya algoritmov planirovaniya dvizheniy kollaborativnykh robotov v avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksakh [Experimental studies of motion planning algorithms for collaborative robots in automated technological complexes]. Morskie intellektualnye tekhnologii [Marine Intellectual Technologies], 2025, no. 4, pt. 3, pp. 66-75. (In Russian)
2. Vis I.F.A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. European Journal of Operational Research, 2006, vol. 170, no. 3, pp. 677-709. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.09.020.
3. Zoutendijk M., Mitici M., Hoekstra J. An investigation of operational management solutions and challenges for electric taxiing of aircraft. Research in Transportation Business and Management, 2023, vol. 49, art. 101019. DOI: 10.1016/j.rtbm.2023.101019.
4. Efimov A.Y., Gorkavyy M.A., Egorova V.P., Solovev D.B. Design of Intelligent Decision Support System for Robotized Welding Technological Processes Optimization. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01–04 October 2019. Vladivostok, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, p. 8933908. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933908.
5. Zheng Z., Lu Y. Research on AGV trackless guidance technology based on the global vision. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2022, vol. 19, no. 4. DOI: 10.1177/00368504221103766.
6. Kim J., Cho S. Development of Vision-Based Autonomous Tug and Towing System. AIAA Aviation Forum and ASCEND, 2024. DOI: 10.2514/6.2024-3743.
7. Gorkavyy M.A., Egorova V.P., Solovev V.A., et al. Razrabotka arkhitektury sistemy upravleniya robotizirovannym proizvodstvennym protsessom na baze tekhnologii tsifrovogo dvoynika [Development of the control system architecture for a robotic production process based on digital twin technology]. Uchenye zapiski Komсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Nauki o prirode i tekhnike [Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Engineering Sciences], 2023, no. I(65), pp. 40-46. (In Russian)
8. Efimov A., Gorkavyy M., Gorkavyy A. Predicting power consumption of robotic complex based on neuro-fuzzy system. Proceedings — 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 May 2020. Sochi, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, p. 9112066. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911206.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Ким К. К., Карпова И. М., Смирнов В. А., Иванов С. Н.
K. K. Kim, I. M. Karpova, V. A. Smirnov, S. N. Ivanov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ЛОПАСТЯХ ВЕТРОГЕЛИОГЕНЕРАТОРА

MODELLING OF COOLING PROCESSES OF SOLAR PANELS LOCATED ON WIND HELIOGENERATOR BLADES

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical Engineering and Heat Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Карпова Ирина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: legierog@gmail.com.

Irina M. Karpova – PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation. E-mail: legierog@gmail.com.

Смирнов Владимир Александрович – кандидат технических наук, заместитель главного инженера Филиала ПАО «РОССЕТИ» – Ленинградское ПМЭС (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: VL555@mail.ru.

Vladimir A. Smirnov – PhD in Engineering, Deputy Chief Engineer of the Leningrad PMES Branch of PJSC ROSSETI (Russia, Sankt-Petersburg). E-mail: VL555@mail.ru

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Sergey N. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Аннотация. Целью исследования является повышение интенсивности охлаждения солнечных панелей, закреплённых на лопастях стандартного ветрогенератора с горизонтальной осью вращения. Исследование теплопереноса для лопасти ветрогелиогенератора проводилось с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Для общего параметрического моделирования воздушного потока, проходящего через внутреннюю полость лопасти, использовался пакет Solid Works Flow Simulation на базе метода конечного объёма (FVM). Рассматривались лопасти различных конструкций (сплошная и с внутренней полостью) и форм (прямая, с изгибом, с дефлектором на конце полый лопасти). Приведены разработанные конструктивные решения изготовления лопастей ветрогелиогенератора, заключающиеся в использовании полый конструкции лопасти, применении изогнутой формы лопасти и расположении дефлектора на конце полый лопасти. Доказано увеличение теплообмена между нагретой солнечными лучами поверхностью лопасти с расположенными на ней кремниевыми солнечными панелями и окружающей средой, в результате температура приближается к оптимальному значению. Обоснованы расположение кремниевых солнечных панелей на лопастях ветрогелиогенератора и использование полый конструкции лопасти изогнутой формы и дефлектора, которые обеспечивают улучшенный температурный режим работы этих панелей.

Summary. The aim of the study is to improve the cooling efficiency of solar panels mounted on the blades of a standard horizontal-axis wind turbine. Blades of various designs (solid and hollow) and shapes (straight, curved, and with a deflector at the end of a hollow blade) were considered. Design solutions developed for wind and solar

turbine blade manufacturing are presented, including the use of a hollow blade design, a curved blade shape, and the placement of a deflector at the end of a hollow blade. The heat transfer study for the wind and solar turbine blade was conducted using COMSOL Multiphysics. SolidWorks Flow Simulation, based on the finite volume method (FVM), was used for general parametric modeling of the airflow through the blade's interior. Increased heat exchange between the solar-heated blade surface with silicon solar panels mounted on it and the surrounding environment has been demonstrated, resulting in temperatures approaching the optimal value. The placement of silicon solar panels on wind turbine blades, along with the use of a hollow, curved blade and deflector, has been substantiated, ensuring improved thermal performance for these panels.

Ключевые слова: ветрогелиогенератор, лопасть, внутренний воздушный поток, гибкая кремниевая солнечная панель, параметрическое моделирование, теплообмен, повышение эффективности.

Key words: wind solar generator, blade, internal air flow, flexible silicon solar panel, parametric modeling, heat exchange, efficiency improvement.

УДК 004.9

Введение. Известно, что при повышении температуры солнечной кремниевой панели на один градус Цельсия свыше $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ генерируемое ею напряжение уменьшается на $0,0021\text{ В}$, что составляет $0,4\text{ \%}$ от номинала. При эксплуатации температура панелей может достигать $60\ldots 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при соответствующем понижении напряжения в $0,07\ldots 0,09\text{ В}$ [1].

Когда температура панели начинает превышать $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, её внутреннее сопротивление растёт, что приводит к уменьшению эффективности её работы. Так как электронный поток возрастает, увеличивается ток фотоэлемента и снижается напряжение, причём последнее уменьшается стремительнее, чем возрастает ток. В результате генерируемая электрическая мощность понижается [2–6].

В данной работе рассматривается новое устройство (ветрогелиогенератор), позволяющее одновременно преобразовывать энергию ветрового потока и солнечной инсоляции в электрическую энергию (см. рис. 1) [7]. Одновременно с этим решается задача усиления интенсивности охлаждения солнечных панелей с целью повышения эффективности их работы. Это достигается за счёт расположения гибких солнечных кремниевых панелей на лицевых плоскостях (обращённых навстречу ветровому потоку) лопастей стандартного ветрогенератора с горизонтальной осью вращения [8–10].

Гибкие солнечные панели 1 закрепляются по всей длине лопастей 2 на их лицевой стороне. Конструкция лопасти 2 выполнена полый. У основания лопасти 2 на лицевой поверхности выполнено входное отверстие 3, а у конца лопасти на тыльной стороне – выходное отверстие 4. Как и у стандартного ветрогенератора, колесо лопастей 2 соединено механической передачей с ротором 5, на котором расположена система возбуждения 6 из постоянных неодимовых магнитов трёхфазного синхронного генератора 7. Статорная обмотка переменного тока генератора обозначена позицией 8. На роторе расположены контактные кольца 9 с электрощётками 10, которые через преобразователь 11 соединён с аккумуляторной батареей 12 [11–13]. Нагрузка обозначена позицией 13.

Энергия солнечного излучения, поглощённого солнечными панелями 1, в результате фотовольтаического эффекта преобразуется в электрическую [6]. Генерируемый панелями электрический ток через узел

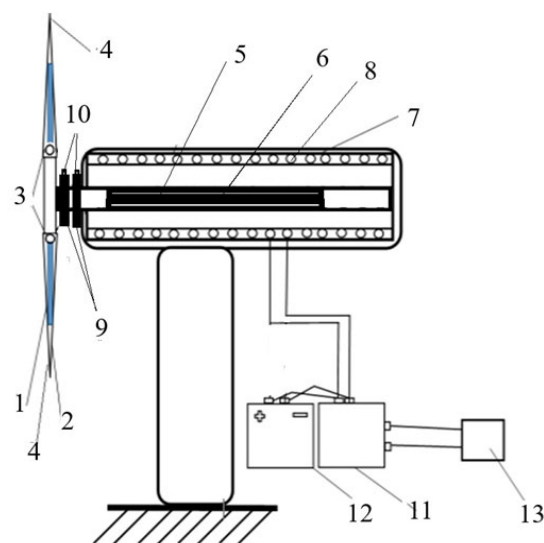


Рис. 1. Конструктивная схема ветрогелиогенератора

скользящего токосъёма, состоящего из контактных колец 9 и электрощёток 10, подаётся на преобразователь 11, а затем на аккумуляторную батарею 12 или на нагрузку 13.

Из-за перепада давлений до и после плоскости ометаемой лопастью поверхности (Δp) (см. рис. 2) происходит засасывание части ветрового потока через отверстие 3 (см. рис. 1) в полость лопасти 2 с последующим выбросом воздуха через выходное отверстие 4. На рис. 2 p_0 – давление невозмущённого воздушного потока.



Рис. 2. Эпюры давления

Такое конструктивное решение повышает эффективность охлаждения солнечных кремниевых панелей, т. к. они охлаждаются как с наружной поверхности, так и с тыльной (через теплопроводящую стенку лопасти).

Определение характерных размеров лопастей ветротурбины. В качестве основы был взят трёхлопастной ветрогенератор классической компоновки номинальной мощности 1,5 МВт, напряжением 480 В с трёхступенчатой планетарной коробкой передач. Ось вращения – горизонтальная. Номинальная скорость ветрового потока – 11,8 м/с. Диаметр ветроколеса – 77 м. Площадь ометаемой поверхности – 3848 м².

Для преобразования энергии солнечного излучения использовались гибкие солнечные кремниевые монокристаллические панели E-Power с фотоэлементами Solar City. Электрические параметры данных панелей следующие: мощность – 160 Вт, рабочее напряжение – 18 В, рабочий ток – 8,89 А. Один модуль состоял из 36 элементов, каждый из которых имел размеры 156×156 мм.

От лопасти как одной из самых важных частей ветротурбины, а конкретнее от её площади и формы, будут зависеть как мощность, так и число оборотов вала ветрогелиогенератора, а его эффективность – от количества лопастей (n).

В рассматриваемом случае быстроходность ветротурбины генератора составила $Z = \sqrt{\frac{80}{n}} = \sqrt{\frac{80}{3}} \approx 5$. Она использовалась для вычисления частоты вращения ротора по формуле $\omega = \frac{60 \times Z \times V}{\pi \times D}$, об/мин, где V – скорость ветрового потока; $D = 2R$ – диаметр ротора.

Длина хорды лопасти, найденная по известному соотношению: $b = \frac{16 \times \pi \times R \times 1,3}{9 \times n \times Z^2}$, где множитель 1,3 – есть отношение ($\frac{R}{r}$), здесь r – расстояние от оси вращения до точки на лопасти, при которой хорда принимает максимальное значение, составила 3,72 м.

Для упрощения расчёта принималось, что лопасть имеет прямоугольную форму площадью, равной 122,4 м², тогда как площадь трёх лопастей составляла 367,2 м².

Предполагалось, что гибкие кремниевые солнечные батареи занимают всю площадь лопасти.

Исследование теплового режима при наружном охлаждении солнечных панелей. На первом этапе исследовался тепловой режим солнечных панелей, расположенных на лопастях вет-

рогелиогенератора, при учёте только наружного охлаждения солнечных панелей. Предполагалось, что ветровой поток (с температурой $20,6^{\circ}\text{C}$) движется со скоростью $5,25\text{ м/с}$ (которая превышает величину скорости «трогания» ветротурбины), уровень солнечного излучения составляет $5,79\text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$. Результаты расчётов приведены в работе [14].

Хотя в результате исследований не было достигнуто оптимальное значение температуры панелей, эффект снижения их температуры предложенным конструктивным решением был очевиден.

Как и следовало ожидать, действенной мерой по достижению оптимальной температуры панели является увеличение числа оборотов ветротурбины, что приводит к возрастанию коэффициента теплоотдачи.

При малых скоростях ветра более высокой эффективностью генерации характеризуются солнечные панели, расположенные ближе к концу лопасти, поэтому целесообразно большую часть панелей устанавливать в оконечной области лопасти. Также следует отметить, что более тонким панелям, изготовленным из материалов с большим значением коэффициента теплопроводности, свойственно более низкое значение термического сопротивления, а это, в свою очередь, приводит к повышению интенсивности охлаждения панелей.

Возможно, благотворно на охлаждение панелей будет влиять усиление турбулентного характера обтекания воздушным потоком поверхности солнечной панели, влекущее за собой повышение коэффициента теплоотдачи. В результате этого интенсивность теплопереноса возрастёт. На практике усилить турбулентный режим можно путём изменения режимных параметров или применением новых конструктивных решений. Например, на поверхности лопастей и солнечных панелей можно выполнить спиралевидные канавки, также целесообразно поверхность солнечных панелей изготовить с искусственной шероховатостью. Сразу следует оговориться, что целесообразность проведения этих мероприятий должна рассматриваться в комплексе с вопросами аэродинамики и прочности.

Исследование лопасти с внутренней полостью. Исследовалось влияние вращения лопасти с внутренней полостью на скорость воздушного потока, протекающего через неё, с помощью пакета SolidWorks [15]. С целью упрощения расчётов сложной многослойной неоднородной конструкции лопасти последняя представлялась прямоугольным полым параллелепипедом с цилиндрическим комлем – «прямая» конструкция (см. рис. 3).

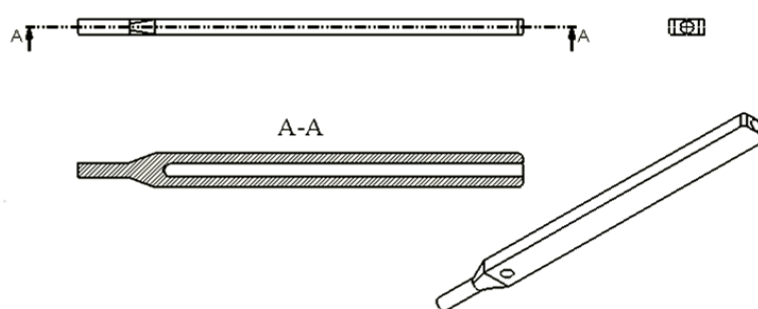


Рис. 3. Модель лопасти

На рис. 4 приведён фрагмент модели ротора ветротурбины в сборе.

Исследование воздушного потока внутри лопасти. Для общего параметрического моделирования потока, проходящего через внутреннюю полость лопасти, использовалось добавление Solid Works Flow Simulation на базе метода конечного объёма (FVM).

Для уменьшения сетки разбиения модели на ячейки и сокращения времени расчёта расчётная область сокращалась.

Граничные условия задавались типом поверхности «Реальная движущая стенка». За систему координат была выбрана система координат ротора. Модель вращается с угловой скоростью

-2,62 рад/с (отрицательное значение угловой скорости свидетельствует о направлении вращения против часовой стрелки).

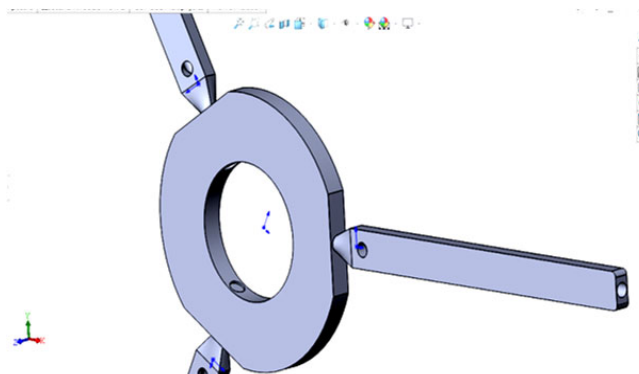


Рис. 4. Модель ротора ветротурбины

В результате расчётов (см. рис. 5) было установлено, что внутренний воздушный поток при данной конструкции лопасти и принятой скорости наружного потока (перед ротором) имеет весьма маленькую скорость $V = 0,2$ м/с и носит турбулентный характер, что свидетельствует о неэффективности рассмотренной «прямой» конструкции лопасти.

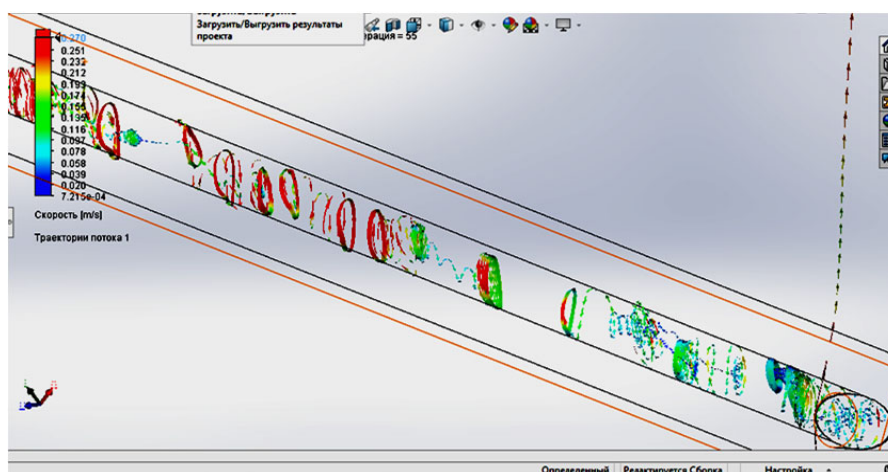


Рис. 5. Воздушный поток внутри лопасти

Чтобы добиться максимально возможной скорости воздушного потока внутри лопасти, была проведена её дальнейшая модернизация.

Исследование влияния конструкции лопасти на скорость воздушного потока внутри неё. Рассматривались конструкции лопасти изогнутой формы, имеющие загиб («колено»). Загнутая часть лопасти (длина «колена») в расчётах варьировалась от $0,015 \times L$ до $0,2 \times L$, где L – длина основной прямолинейной части лопасти, а угол загиба от 90° до -45° . Исследовались разные сочетания указанных геометрических параметров.

Вид лопасти с «коленом» с длиной, равной $0,05L$ (лопасть загнута под углом 90°), дан на рис. 6.

На рис. 7 показана картина воздушного потока, соответствующего случаю на рис. 6.

Можно констатировать, что воздушный поток в рассматриваемом случае носит ламинарный характер, при этом скорость потока воздуха равна $V \approx 0,83$ м/с. По сравнению с «прямой» конструкцией лопасти скорость воздушного потока во внутренней полости возросла в разы.



Рис. 6. Лопасть с длиной «колена», равной $0,05L$, лопасть загнута под углом 90°

Увеличение длины «колена» при сохранении угла его загиба (90°) приводило к увеличению скорости потока при ламинарном характере течения. Однако непрерывное увеличение длины «колена» ограничивается по соображениям аэродинамики и прочности конструкции.

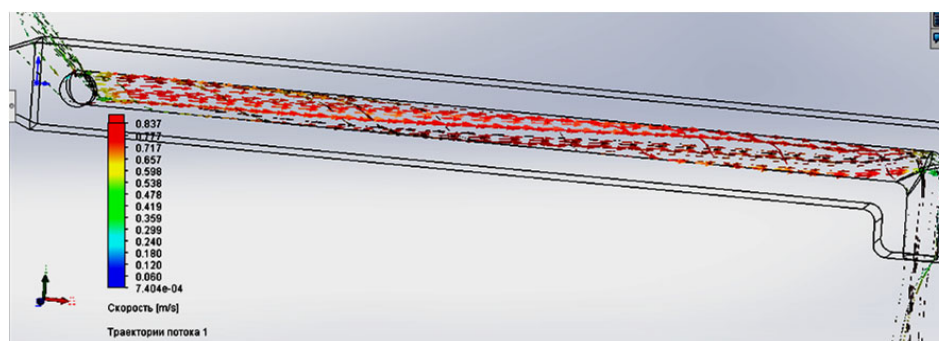


Рис. 7. Картина воздушного потока, протекающего по внутренней полости лопасти

Затем исследовалось влияние изменения угла загиба «колена» на скорость и характер внутреннего потока. В результате было установлено, что оптимальный вариант, характеризующийся наибольшей скоростью внутреннего воздушного потока, имеет длину «колена», равную $0,15L$ и угол загиба 30° (см. рис. 8).



Рис. 8. Вид оптимального варианта лопасти

Картина воздушного потока для оптимального варианта лопасти показана на рис. 9.

Из рисунка видно, что при скорости внутреннего воздушного потока, равной $1,51$ м/с, ламинарный характер его течения сохраняется. Можно говорить, что выполненные конструктивные изменения лопасти позволяют увеличить скорость воздушного потока во внутренней полости лопасти приблизительно в 8 раз по сравнению с «прямой» конструкцией лопасти.

Результаты расчётов лопастей с «коленом», загнутым в противоположную сторону (под отрицательными углами), показали, что в этом случае скорость внутреннего воздушного потока снижается по сравнению с оптимальным вариантом, однако ламинарный характер течения воздушного потока сохраняется.

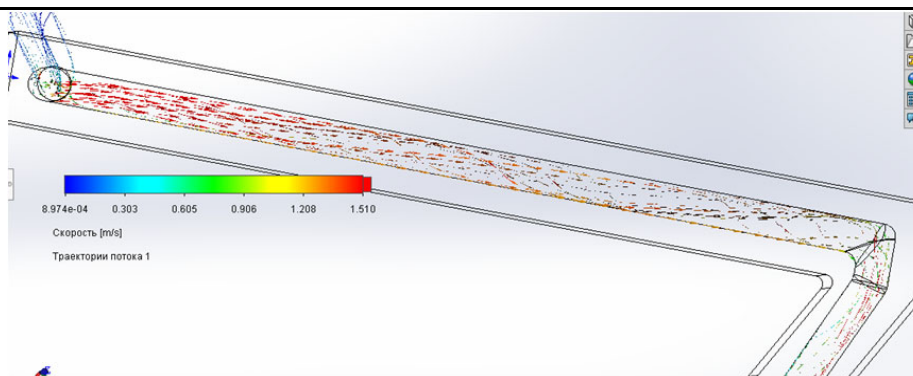


Рис. 9. Поле скоростей для оптимального варианта лопасти

Влияние дефлектора на скорость внутреннего воздушного потока. Использование дефлектора приводит к некоторому увеличению скорости внутреннего воздушного потока, сопровождающее повышение сопротивления вращению ротора можно считать как определённую плату за это.

На первом этапе в среде пакета Solid Works была построена модель дефлектора, который представлялся усечённой полый пирамидой. Дефлектор располагался на конце лопасти оптимального варианта (см. рис. 10).

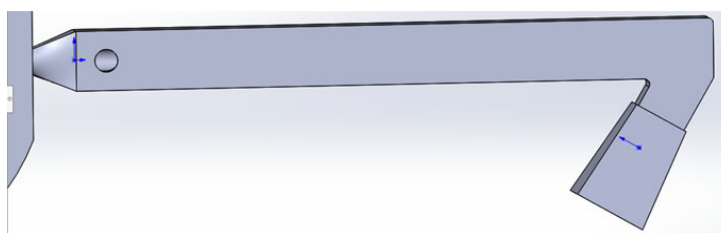


Рис. 10. Вариант модели с дефлектором

С помощью модуля Flow Simulation программы Solid Works была получена картина внутреннего воздушного потока для данного случая (см. рис. 11).

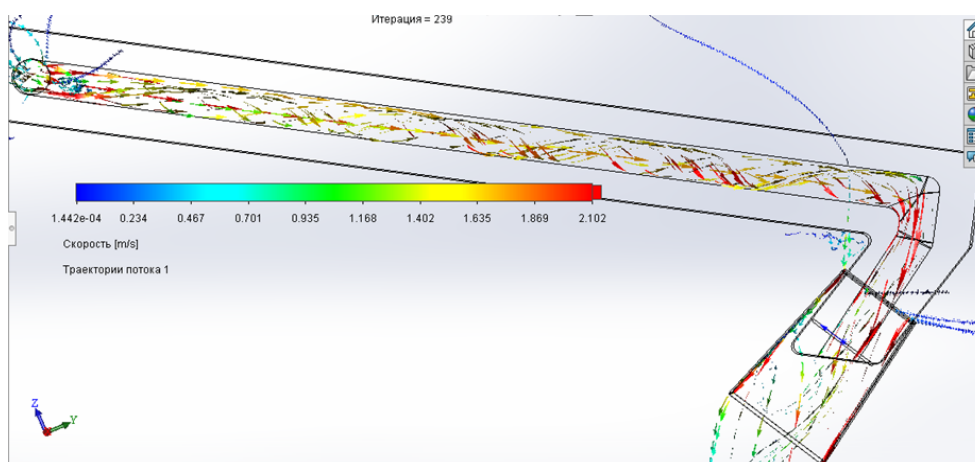


Рис. 11. Поле скоростей воздушного потока лопасти с дефлектором

Конструкции лопасти и дефлектора предполагают наличие зазора между внешней стенкой лопасти и внутренней стенкой дефлектора. Как показано на рис. 11, внешний ускоренный воздуш-

ный поток, проходящий через этот зазор, увлекает за собой более медленный внутренний поток, вытекающий из выходного отверстия на конце лопасти.

Наличие дефлектора не изменяет характер течения внутреннего воздушного потока. Он остается ламинарным, при этом скорость воздушного потока возросла в 1,3 раза (среднее значение $V \approx 2$ м/с).

Исследование теплопереноса для лопасти ветрогелиогенератора. Инструментом в данном исследовании являлся пакет COMSOL Multiphysics.

Расчёты проводились при следующих допущениях:

- стенки лопасти, выполненные из эпоксидного компаунда, армированного стеклопластиком, однородны по толщине;
- частота вращения лопастей постоянна и равна 2,62 рад/с;
- солнечной инсоляции подвергаются только лицевые плоскости лопастей, ориентированные навстречу ветровому потоку;
- теплоотвод конвекцией учитывается только с лицевой плоскости лопасти, а на тыльной её плоскости и боковых гранях выполняются условия теплоизоляции.

Начальные данные для расчётов:

- поток солнечного излучения равен 800 Вт/м²;
- скорость ветра – 4,2 м/с;
- температура окружающего воздуха – 23,8 °С.

Учитывалась форма внутреннего канала лопасти. Он имел следующие размеры: длина канала – 36 м, толщина стенки – 0,02 м, ширина поперечного сечения – 0,2 м.

Исследования базировались на решении уравнения теплопроводности при заданных граничных условиях [16]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \times \nabla T + \nabla \times q = Q + Q_{ted},$$

где ρ – плотность; C_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении; T – температура; t – время; u – скорость воздушного потока; ∇ – оператор набла; q – плотность теплового потока, передаваемого с поверхности панели в окружающую среду, $q = -k\nabla T$, здесь k – коэффициент теплопередачи (знак «минус» означает, что теплота переносится в сторону уменьшения температуры); Q – тепловой поток; Q_{ted} – тепловой поток, возникающий при деформации материала [16].

Граничные условия задавались следующим образом:

- на верхней границе воздушного потока его температура равна температуре окружающей среды;
- для левой границы устанавливалось граничное условие «Inflow», указывающее на вход воздушного потока во внутреннюю полость лопасти;
- для правой границы устанавливалось граничное условие «Outflow», обозначающее выход воздушного потока из внутренней полости лопасти;
- на внешней границе стенки выполнялось граничное условие «Heat flux». Данным условием обозначался поток нагретого воздуха, скорость движения которого реализовывалась с помощью команды «Heatrate».

С целью упрощения расчёта с помощью интерфейса «Laminar flow» были определены параметры потока воздуха, имеющего ламинарный характер. Границы потока обозначались с помощью команд «Wall 1» (нижняя граница) и «Wall 2» (верхняя граница).

В начале воздушного потока его скорость задавалась командой «Inlet», а в конце потока устанавливалось условие для давления «Sup press back flow» (давление, подавляющее обратный поток) с помощью команды «Outlet».

Для объединения двух физических процессов: «Heat Transfer in Solids» и «Laminar flow» в одну задачу была использована команда «Multiphysics».

Тепловой расчёт осуществлялся с помощью команды «Stady». Его результаты представлены на рис. 12. Из него видно, что распределение температуры по длине лопасти аналогично сте-

пенной функции корня чётной степени. Температура нагрева стенки лопасти изменяется в диапазоне от 27 до 46,5 °C при среднем значении, равном 37 °C, что примерно в 1,5 раза ниже по сравнению со случаем использования лопасти без внутреннего охлаждения.

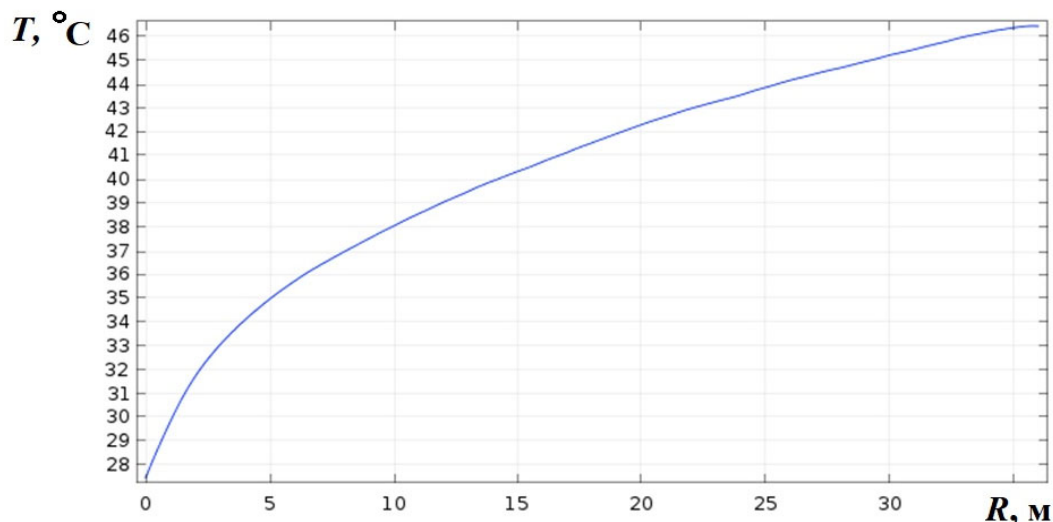


Рис. 12. Результаты теплового расчёта

В последующем были выполнены тепловые расчёты при варьировании температуры окружающей среды от 15,8 до 23,8 °C и потока солнечного излучения от 470 до 800 Вт/м² (в различных комбинациях). Было выявлено, что установившееся значение температуры стенки лопасти для указанных условий колеблется в диапазоне:

- без внутреннего охлаждения – от 31,05 до 47,98 °C,
- с внутренним охлаждением – от 20 до 37 °C.

Это позволяет позитивно оценивать влияние предлагаемого конструктивного исполнения лопасти на интенсивность охлаждения солнечных панелей, а следовательно, на генерацию ими электрической энергии.

Заключение. Проведённые исследования показали, что повышения эффективности температурного режима работы кремниевых солнечных панелей можно достичь с помощью конструктивного решения – расположения последних на лопастях ветротурбины. Охлаждающий эффект усиливается, если использовать лопасти с внутренним каналом, в который принудительно засасывается часть внешнего ветрового потока. Расположение солнечных панелей ближе к концам лопастей, использование лопастей изогнутой формы и дефлекторов также приводят к возрастанию интенсивности охлаждения панелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гульков, В. Н. Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффективность преобразования излучения / В. Н. Гульков, И. Д. Колесниченко, К. Е. Коротков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 1. – С. 10-16.
2. Казанский, А. Г. Тонкоплёночные кремниевые солнечные элементы на гибких подложках / А. Г. Казанский // Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 7. – № 1. – С. 15-24.
3. Schubert M. B., Merz R. Flexible solar cells and modules. Philosophical Magazine. 2009. 89: p. 2623-2644.
4. Williamson D. L. Nanostructure of a-Si:H and related materials by small-angle X-ray scattering. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1995, 377: p. 251-254.
5. Dennler G., Forberich K., Ameri T., Waldauf C., Denk P., Brabec C. J., Hingerl K., Heeger A. J. Design of efficient organic tandem cells: on the interplay between molecular absorption and layer sequence. Journal Applied Physics. 2007, 102: p. 123109-1-123109-6.
6. Афанасьев, В. П. Тонкоплёночные солнечные системы на основе кремния / В. П. Афанасьев, Е. И. Теруков, А. А. Шерченков. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.

7. Патент № 197430 РФ, МПК F03D1/00, F03D9/00. Ветрогенератор: № 2019139281, заявлено 02.12.2019; опубликовано 24.04.2020 / заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС). – Бюл. № 12.
8. да Роза, А. В. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы / А. В. да Роза. – Долгопрудный: «Интеллект»; М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 704 с.
9. Юдаев, И. В. Возобновляемые источники энергии / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус, В. В. Гамага. – СПб.: Лань, 2020. – 328 с.
10. Земсков, В. И. Возобновляемые источники энергии в АПК / В. И. Земсков. – СПб.: Лань, 2014. – 368 с.
11. Volker Quaschnig. Understanding Renewable Energy Systems. London: Earthscan, 2005. 289 p.
12. Кашкаров, А. П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции / А. П. Кашкаров. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 145 с.
13. Горяев, А. А. Возобновляемые источники энергии / А. А. Горяев, Г. А. Шепель. – Архангельск: САФУ, 2010. – 120 с.
14. Kim K., Panychev A., Blazhko L. Improving the Efficiency of Thin-Film Silicon Solar Panels // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Corpus ID: 235406562. Published 17 May 2021. P.966–970. DOI:10.1109/ICIEAM51226.2021.9446395.
15. Патент № 040487, Евразийское патентное ведомство, МПК F03D1/00, F03D9/00. Ветрогенератор: № 202100092, заявлено 26.08.2021; дата выдачи патента 09.06.2022 / заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).
16. Ким, К. К. Алгоритм CFD-моделирования процесса теплопереноса в совмещённом электротехническом устройстве / К. К. Ким, С. Н. Иванов, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 65-72.

REFERENCES

1. Gulkov V. N., Kolesnichenko I. D., Korotkov K. E. Investigation of the effect of heating solar modules on the efficiency of radiation conversion. Izvestiya SPbSETU «LETI». 2019. No. 1: 10 – 16. (In Russ.).
2. Kazansky A. G. Thin-film silicon solar cells on flexible substrates. Radioelectronics. 2015. 1. 7: 15–24. (In Russ.).
3. Schubert M. B., Merz R. Flexible solar cells and modules. Philosophical Magazine. 2009. 89: 2623-2644.
4. Williamson D. L. Nanostructure of a-Si:H and related materials by small-angle X-ray scattering. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1995. 377: 251-254.
5. Dennler G., Forberich K., Ameri T., Waldauf C., Denk P., Brabec C.J., Hingerl K., Heeger A.J. Design of efficient organic tandem cells: on the interplay between molecular absorption and layer sequence. Journal Applied Physics. 2007. 102: 123109-1-123109-6.
6. Afanasyev V. P., Terukov E. I., Sherchenkov A. A. Thin-film solar systems based on silicon. St. Petersburg: ETU «LETI» Publishing House, 2011. 168 p.
7. Patent 197430 RF. IPC F03D1/00, F03D9/00. Wind generator / Applicant and patent holder Federal State Budget Educational Institution for Higher Education “Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University” (PGUPS). No. 2019139281, application 02.12.2019; publ. 24.04.2020 // Bul. No. 12.
8. A da Roza. Renewable Energy Sources. Physical and Technical Foundations. Dolgoprudny: Intellect Publishing House; Moscow: MEI Publishing House, 2010. 704 p.
9. Yudaev I. V., Daus Yu. V., Gamaga V. V. Renewable Energy Sources. St. Petersburg: Lan, 2020. 328 p.
10. Zemskov V. I. Renewable Energy Sources in the AIC. St. Petersburg: Lan, 2014. 368 p.
11. Volker Quaschnig. Understanding Renewable Energy Systems. London: Earthscan, 2005. 289 p.
12. Kashkarov A. P. Wind turbines, solar batteries, and other useful designs. Moscow: DMK Press. 2023. 145 p.
13. Goryaev A. A., Shepel G. A. Renewable Energy Sources. Arkhangelsk: NArFU, 2010. 120 p.
14. Kim K., Panychev A., Blazhko L. Improving the Efficiency of Thin-Film Silicon Solar Panels // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Corpus ID: 235406562. Published 17 May 2021. P. 966 – 970. DOI:10.1109/ICIEAM51226.2021.9446395.
15. Eurasian Patent 040487. IPC F03D1/00, F03D9/00. Wind Generator / Applicant and Patent Holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University» (FGBOU VO PGUPS). No. 202100092, filed August 26, 2021; patent issue date June 9, 20221.
16. Kim K. K., Prosolovich A. A., Ivanov S. N. Algorithm for CFD modeling of heat transfer in a combined electrical device. Scientific notes of KnAGTU=Nauchnyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. 2020. II-1 (42): 65-73. (In Russ.).



Евстигнеев А. И., Колошенко Ю. Б., Бахматов П. В.
A. I. Evstigneev, Yu. B. Koloshenko, P. V. Bakhmatov

СХОДИМОСТЬ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВЛИЯНИИ КОЛЬЦЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЫТОЧЕК НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

CONVERGENCE OF NUMERICAL SOLUTION FOR THE PROBLEM OF THE EFFECT OF ANNULAR TECHNOLOGICAL GROOVES ON THE STRESS-STRAIN STATE OF SPHERICAL METAL CASTING MOLDS

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

Aleksey I. Evstigneev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Scientific Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Колошенко Юлия Борисовна – старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и механика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: koloshenko2011@yandex.ru.

Yuliya B. Koloshenko – Senior Lecturer, Shipbuilding and Mechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: koloshenko2011@yandex.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства имени В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyov, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В работе исследуется сходимость численного решения задачи о влиянии кольцевых технологических выточек (температурных швов) на напряжённо-деформированное состояние (НДС) сферических металлических литейных форм при кристаллизации стальной отливки. Рассматриваются два варианта: форма без выточек и с ними. Формулируется задача оптимизации конструктивных параметров выточек с целью снижения уровня нормальных напряжений. Результаты представлены в виде эпюр напряжений в разных сечениях и моментах времени. Полученные данные позволяют обоснованно выбирать расположение и параметры выточек для повышения стойкости литейных форм.

Summary. The paper investigates the convergence of the numerical solution to the problem of annular technological grooves influence (temperature joints) on the stress-strain state (SSS) of spherical metal casting molds during the crystallization of steel castings. Two variants are considered: a mold without grooves and one with them. The problem of optimizing the design parameters of the grooves in order to reduce the level of normal stresses is formulated. The results are presented in the form of stress diagrams at different cross-sections and time points. The obtained data make it possible to reasonably select the location and parameters of the grooves to increase the durability of casting molds.

Ключевые слова: сферическая литейная форма, численное решение, сходимость, напряжённо-деформированное состояние, температурные напряжения.

Key words: spherical casting mold, numerical solution, convergence, grooves, stress-strain state, thermal stresses.

УДК 539.5,621.74

В работе [1] установлено влияние наличия и параметров кольцевых технологических швов (выточек) во внутренней поверхности литейной металлической сферической формы на уровень напряжённо-деформированного состояния (НДС) в ней при кристаллизации стальной отливки.

Сформулирована задача оптимизации конструктивных параметров технологических швов от величины возникающих в такой литейной металлической форме (ЛМФ) нормальных напряжений σ_{22} в начальной стадии кристаллизации стальной отливки.

В работе [2] дана оценка НДС и температурного состояния не только металлических, но и керамических сферических литейных форм с технологическими швами.

Однако в этих работах не исследована сходимость при разбиении области на элементы, что и послужило основанием для выполнения настоящей работы.

На рис. 1 представлены эскизы исследуемых расчётных схем литейной сферической металлической формы без выточек (а) и с выточками (б) с затвердевшей корочкой металла через 8,6 с.

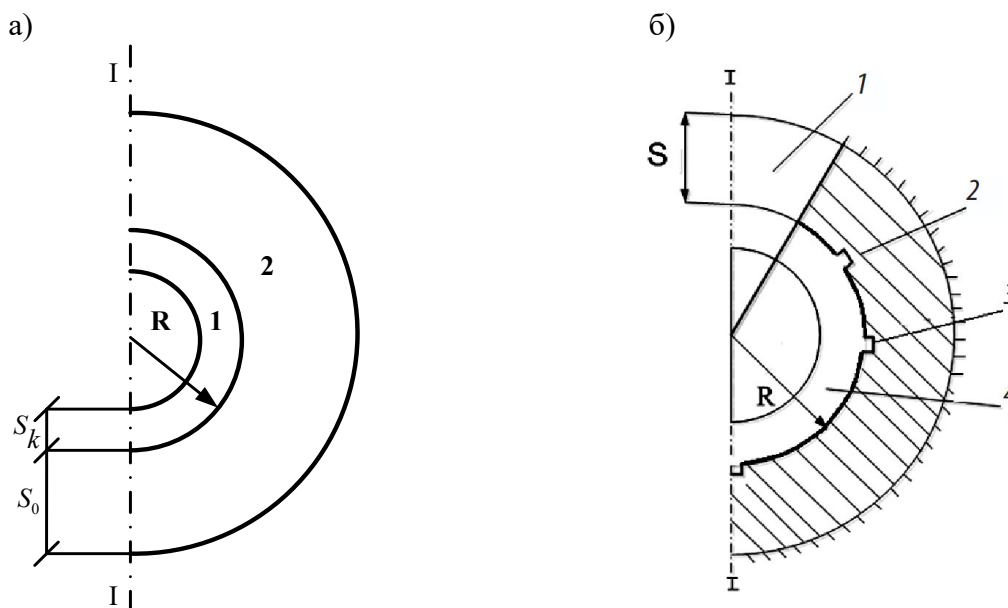


Рис. 1. Расчётные схемы литейной сферической металлической формы на рассматриваемом временном шаге $\tau = 8$ с:

а – без выточек: 1 – корочка затвердевшего металла; 2 – литейная форма;

S_0 – толщина формы $R = 20$ мм; $S_0 = 50$ мм; $S_k = 2,6$ мм;

б – с выточками: 1 – литниковая воронка; 2 – сферическая металлическая литейная форма толщиной S ; 3 – круговые выточки; 4 – затвердевшая корочка металла

Методика вычислений приведена в работах [3; 4]. Разбиение области показано на рис. 2, где приведён вырезанный элемент из сферической области, поскольку это элементарное пересечение радиальных и тангенциальных линий в меридианном сечении. Так как задача осесимметричная, то достаточно показать результаты только в меридианном сечении с учётом оси симметрии.

Задача осесимметричная, поэтому напряжения σ_{31} , σ_{32} и перемещения U_3 равны нулю. По третьей координате имеем только σ_{33} , которое вычисляется по обобщённому закону Гука при найденных в элементе значениях σ_{11} , σ_{22} , U_1 , U_2 .

Разбиение на $N1$ и $N2$ – это разбивка области по первой и второй координатной оси.

Анализ расчётных параметров по оси вращения на рассматриваемом временном шаге при разбиении области соответственно по координатам 1 и 2 на $N1 \times N2 = 13 \times 20$ и $N1 \times N2 = 13 \times 10$, с учётом разбиения формы по $N1$ на 7 элементов и сформировавшейся корочки на 6 элементов по $N1$ показал, что результаты по σ_{22} на оси симметрии практически одни и те же. Это подтверждается тем, что эпюры σ_{22} по всем сечениям практически совпадают.

Таким образом, степень разбиения области по $N2$ практически не влияет на эпюру σ_{22} по направлению $N1$.

Аналогичные результаты получены и при разбиении области $N1 \times N2 = 18 \times 10$, где форма разбита на 12 элементов по $N1$.

При разбиении области на $N1 \times N2 = 21 \times 10$ результаты аналогичные.

На рис. 3 представлены эпюры σ_{22} по оси симметрии при разных разбиениях области. Эпюра σ_{22} при $N1 \times N2 = 13 \times 10$ не приведена, т. к. она практически совпадает с σ_{22} при разбиении 13×20 .

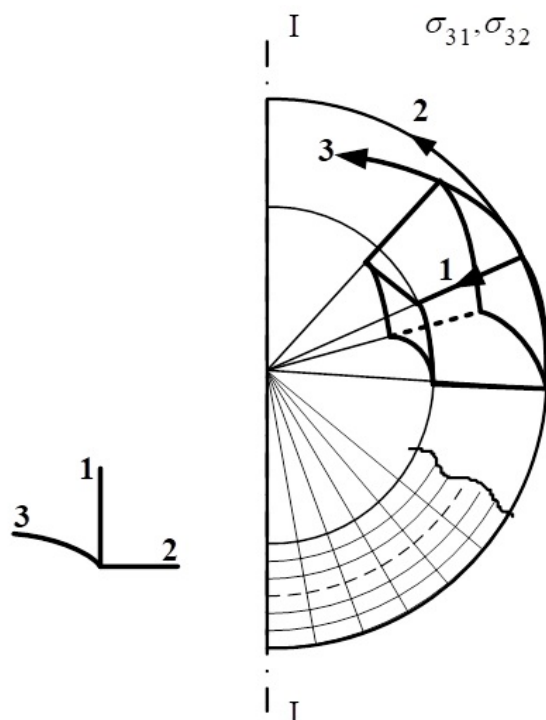


Рис. 2. Элемент сферической области

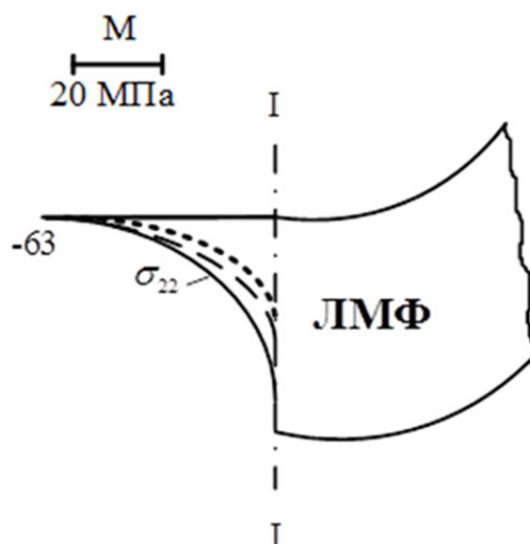


Рис. 3. Эпюры напряжений σ_{22} по оси симметрии при разбиении области:

- – разбиение 13×20 ;
- – разбиение 18×10 ;
- – разбиение 21×10

Для вопроса достоверности полученных результатов выполнен расчёт по разным сеткам разбиения области, когда на внутренней поверхности S_2 нанесена одна круговая выточка (см. рис. 4). Размеры выточки и физические данные материала такие же, как в [2]. Выточка расположена на $\Delta\varphi_0 = 22,5^\circ$ от оси вращения, как и показано на рис. 2 в статье [2]. Первое разбиение области выполнено, как и в статье [2] $N1 \times N2 = 13 \times 20$, эпюра «В» по σ_{22} (см. рис. 4). Видно, как резко меняется напряжённое состояние σ_{22} на поверхности S_2 в довольно широком диапазоне. Второе разбиение области $N1 \times N2 = 13 \times 40$ (эпюра «С») (см. рис. 4). Видны небольшие изменения в пределах 5-12 %. Но мы и не собирались получать абсолютно точные результаты. Нам нужно было показать тенденцию, влияющую на напряжённое состояние от использования новой конструкции литейной формы, имеющей круговые выточки.

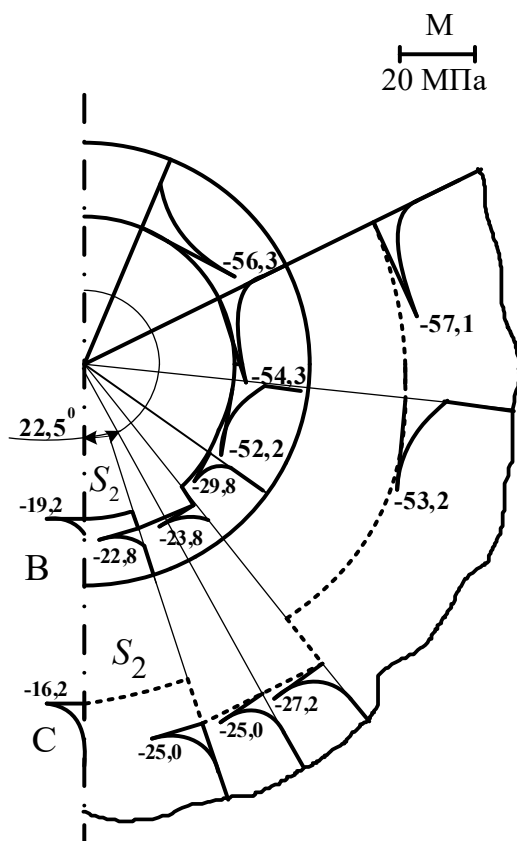


Рис. 4 Эпюры напряжений σ_{22} по сечению литейной металлической формы

Таким образом, доказано, что принятая разбивка области на 13x20 вполне пригодна для анализа проводимых расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование и оптимизация влияния температурных швов на напряжённо-деформированное состояние сферических металлических литейных форм / А. И. Евстигнеев, Д. В. Чернышова, В. И. Одинокоев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2025. – Т. 68. – № 4. – С. 372-382.
2. Оценка напряжённо-деформированного состояния керамических и металлических литейных форм с кольцевыми швами / А. И. Евстигнеев, Д. В. Чернышова, Ю. Б. Колошенко [и др.] // Металлург. – 2025. – № 8. – С. 93-97.
3. Математическое моделирование процесса кристаллизации металла в оболочковой осесимметричной форме / А. И. Евстигнеев, В. В. Петров, В. И. Одинокоев, М. В. Салина // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2005. – № 9. – С. 41-45.
4. Математическое моделирование процесса получения отливок в керамические оболочковые формы / В. И. Одинокоев, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, А. В. Свиридов. – М.: Инновационное машиностроение, 2020. – 224 с.

REFERENCES

1. Evstigneev A.I., Chernyshova D.V., Odinokov V.I., et al. Modelirovanie i optimizatsiya vliyaniya temperaturnykh shvov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sfericheskikh metallicheskh litynykh form [Modeling and optimization of the influence of thermal joints on the stress-strain state of spherical metal casting molds]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy], 2025, vol. 68, no. 4, pp. 372-382. (In Russian). doi: 10.17073/0368-0797-2025-4-372-382.
2. Evstigneev A.I., Chernyshova D.V., Koloshenko Yu.B., et al. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya keramicheskikh i metallicheskh litynykh form s koltsevyimi shvami [Assessment of the stress-strain state of ceramic and metal casting molds with ring joints].



state of ceramic and metal casting molds with annular joints]. *Metallurg* [Metallurgist], 2025, no. 8, pp. 93-97. (In Russian). doi: 10.52351/00260827_2025_8_93.

3. Evstigneev A.I., Petrov V.V., Odinson V.I., Salina M.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa kristallizatsii metalla v obolochnoy osesimmetrichnoy forme [Mathematical modeling of the metal crystallization process in a shell axisymmetric mold]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy], 2005, no. 9, pp. 41-45. (In Russian)

4. Odinson V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., Sviridov A.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa polucheniya otlivki v keramicheskie obolochnye formy [Mathematical modeling of the process of producing castings in ceramic shell molds]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2020. 224 p. (In Russian)

Хасаншин С. Д., Григорьева А. Л., Лазутина В. Р.
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ВЕТРА И ГРАДИЕНТА СДВИГА
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ

Хасаншин С. Д., Григорьева А. Л., Лазутина В. Р.
S. D. Khasanshin, A. L. Grigorieva, V. R. Lazutina

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ВЕТРА И ГРАДИЕНТА
СДВИГА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ**

**NUMERICAL ANALYSIS OF AERODYNAMIC WIND PROFILE AND SHEAR GRADIENT
FOR VARIOUS TYPES OF UNDERLYING SURFACE IN THE SOFTWARE PACKAGE**

Хасаншин Сергей Дамерович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: khasanschin.02@mail.ru.

Sergey D. Khasanshin – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: khasanschin.02@mail.ru.

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая 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 the Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: naj198282@mail.ru.

Лазутина Вероника Романовна – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Veronika R. Lazutina – a Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Оценка ветровых воздействий на высотные здания и башенные краны требует перехода от упрощённых нормативных методов к аппарату механики сплошных сред и вычислительной гидродинамики. Точность численного решения уравнений Навье-Стокса критически зависит от корректности задания граничных условий на входе в расчётную область, учитывающих шероховатость рельефа местности. В статье рассматривается математическое моделирование пограничного слоя атмосферы на основе степенного закона Хеллмана и закона вязкого трения Ньютона. Представлен разработанный программный модуль, предназначенный для расчёта вертикальных профилей скорости ветра и генерации полей касательных напряжений (градиентов сдвига) для различных типов местности (открытая, сельская, городская).

Summary. Assessing wind impacts on high-rise buildings and tower cranes requires a shift from simplified standard methods to the tools of continuum mechanics and computational fluid dynamics. The accuracy of numerical solutions to the Navier-Stokes equations critically depends on the correctness of boundary conditions at the entrance to the computational domain, taking into account the terrain roughness. This article examines mathematical modeling of the atmospheric boundary layer based on Hellman's power law and Newton's law of viscous friction. A software module developed for calculating vertical wind velocity profiles and generating shear stress fields (shear gradients) for various terrain types (open, rural, and urban) is presented.

Ключевые слова: механика сплошных сред, закон Хеллмана, градиент сдвига, касательное напряжение, ветровая нагрузка, вычислительная гидродинамика, пограничный слой атмосферы, численное моделирование, опрокидывающий момент.

Key words: continuum mechanics, Hellman's law, shear gradient, shear stress, wind load, computational fluid dynamics, atmospheric boundary layer, numerical modeling, overturning moment.

УДК 51-7

Введение. Современное развитие строительной индустрии характеризуется увеличением этажности зданий и сооружений, что обуславливает повышенные требования к оценке ветровых воздействий. Ветровые нагрузки представляют собой сложный динамический процесс, требующий применения методов механики сплошных сред и вычислительной гидродинамики (CFD) для точ-

ного моделирования воздушных потоков. Оценка ветровых воздействий на высотные здания и башенные краны требует перехода от упрощённых нормативных методов к аппарату механики сплошных сред и вычислительной гидродинамики. Точность численного решения уравнений Навье-Стокса критически зависит от корректности задания граничных условий на входе в расчётную область, учитывающих шероховатость рельефа местности [1].

В соответствии с ISO 4302:2016, ветровая нагрузка на краны определяется с учётом аэродинамических коэффициентов формы и коэффициентов экранирования для различных типов конструкций [2]. Стандарт устанавливает методы расчёта ветровых нагрузок как для рабочих условий, так и для нерабочих состояний кранов.

Исследования показывают, что критическая скорость ветра, вызывающая опрокидывание башенного крана, существенно варьируется в зависимости от геометрической конфигурации крана относительно направления ветра. Численное моделирование методом CFD позволяет определить аэродинамические силы и моменты, действующие на конструкцию, с последующей валидацией результатов согласно применимым стандартам.

Математическое моделирование пограничного слоя атмосферы основывается на степенном законе Хеллмана и законе вязкого трения Ньютона. Вертикальные профили скорости ветра описываются зависимостями, учитывающими категорию местности (открытая, сельская, городская) и соответствующие коэффициенты шероховатости. Применение методов вычислительной гидродинамики для моделирования воздушных потоков вокруг строительных объектов требует учёта турбулентности, которая описывается с помощью k - ϵ модели или других моделей турбулентности. Граничные условия включают задание профилей скорости ветра на входе в расчётную область и условий на поверхности земли с учётом шероховатости.

Целью работы явилось создание математической модели воздушных потоков с использованием векторных полей на основе уравнений механики сплошных сред для оценки ветровых воздействий на высотные сооружения и крановые конструкции.

Математическое моделирование пограничного слоя атмосферы. В рамках механики сплошных сред атмосферный воздух рассматривается как вязкая среда, обтекающая шероховатую поверхность земли. Формирование вертикального профиля скорости ветра в приземном слое атмосферы обусловлено действием касательных напряжений, возникающих из-за вязкого трения между слоями воздуха и подстилающей поверхностью (верхний слой атмосферы). Согласно закону вязкого трения Ньютона,

$$\tau = \mu \cdot \frac{dV}{dz}, \quad (1)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$; $\frac{dV}{dz}$ – градиент сдвига скорости ветра по высоте z , с^{-1} .

Именно градиент сдвига является фундаментальной характеристикой, определяющей интенсивность генерации турбулентности в пограничном слое, что критически важно при задании граничных условий.

Для инженерных расчётов и численного моделирования стационарного ветрового потока наиболее широкое применение получил степенной закон Хеллмана [3], который аппроксимирует профиль средней скорости ветра $V(z)$ в зависимости от высоты:

$$V(z) = V_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha,$$

где V_{ref} – известная скорость ветра на опорной высоте z_{ref} (в данной работе принимается $z_{ref} = 40$ м); α – безразмерный показатель шероховатости подстилающей поверхности, зависящий от типа местности (открытая, сельская, городская застройка).

Для оценки ветрового воздействия на высотные сооружения и башенные краны необходимо определить не только скорость потока, но и точку приложения равнодействующей аэродинамической нагрузки. Скоростной напор $q(z)$ на высоте z определяется по формуле

$$q(z) = \frac{\rho \cdot V(z)^2}{2},$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 .

Равнодействующая ветровая нагрузка F и опрокидывающий момент M_{tip} относительно основания сооружения высотой H вычисляются путём численного интегрирования скоростного напора по высоте:

$$F = \int_0^H q(z) dz,$$

$$M_{tip} = \int_0^H z \cdot q(z) dz.$$

Высота центра давления z_{cp} , представляющая собой точку приложения равнодействующей ветровой силы, определяется как отношение опрокидывающего момента к равнодействующей нагрузке:

$$z_{cp} = \frac{M_{tip}}{F} = \frac{\int_0^H z \cdot q(z) dz}{\int_0^H q(z) dz}.$$

Аналитическое вычисление данных интегралов для степенного закона Хеллмана возможно, однако в реальных инженерных задачах, учитывающих переменное аэродинамическое сопротивление конструкции по высоте, применяется численное интегрирование. В разработанном программном модуле для этой цели используется метод трапеций (см. рис. 1), обеспечивающий высокую точность аппроксимации при дискретном задании профиля скорости.

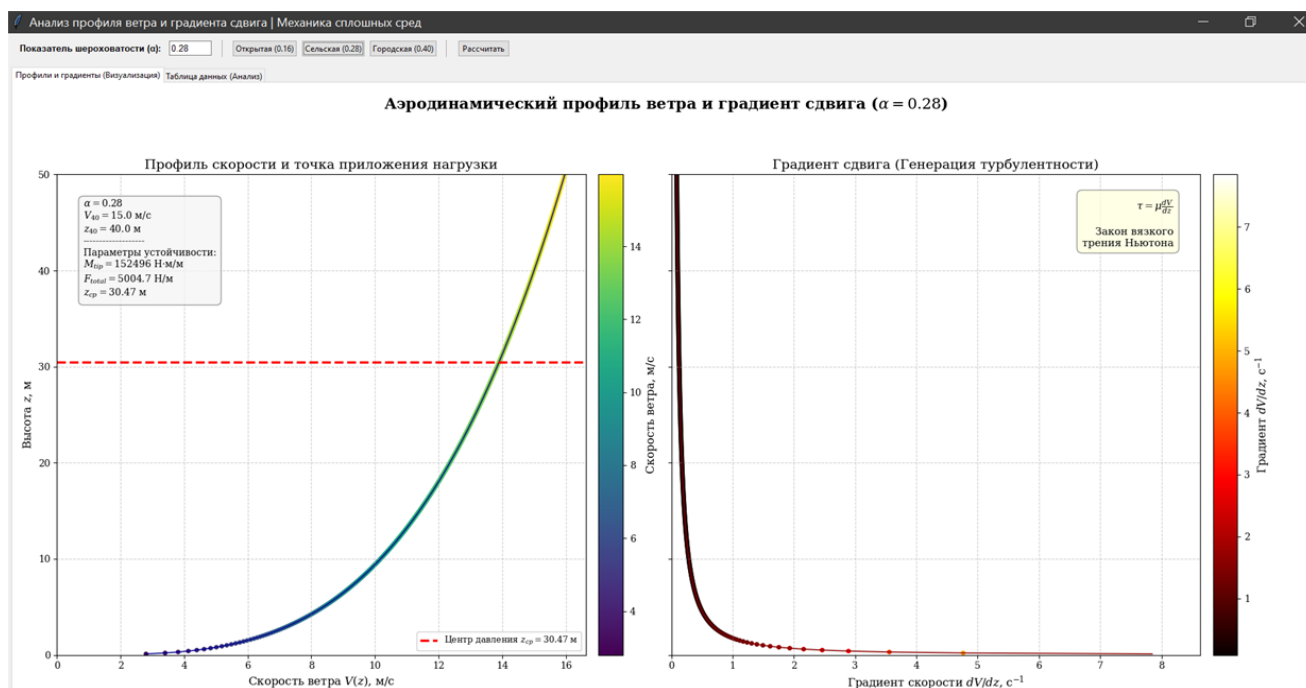


Рис. 1. Окно программного модуля для расчёта характеристик ветра
 (сельская местность $\alpha = 0,28$)

Программный модуль. Разработанная программа построена по модульному принципу, в котором слой пользовательского интерфейса строго отделён от вычислительного ядра. Такое архитектурное решение позволяет модифицировать алгоритмы численного моделирования без изменения логики взаимодействия с пользователем.

Главное окно программы (см. рис. 2) предоставляет инженеру интерфейс для задания граничных условий. В качестве входных параметров задаются опорная скорость ветра V_{ref} на высоте z_{ref} , а также безразмерный показатель шероховатости подстилающей поверхности α . Для ускорения работы предусмотрены предустановленные категории местности, соответствующие стандартным аэродинамическим профилям: открытая местность ($\alpha = 0,16$), сельская или пригородная застройка ($\alpha = 0,28$) (см. рис. 2) и плотная городская среда ($\alpha = 0,40$).

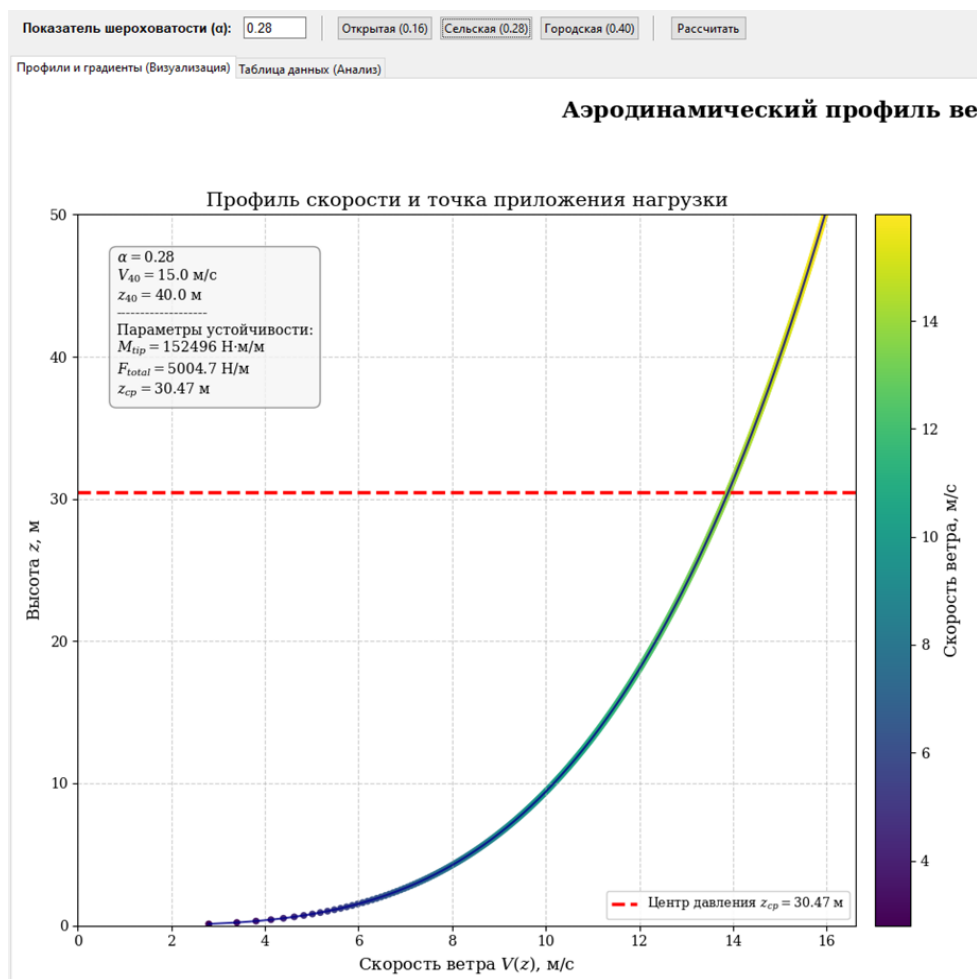


Рис. 2. График профиля скорости со значением $\alpha = 0,28$

Для оценки интегральных характеристик ветрового воздействия на высотное сооружение или башенный кран модуль рассчитывает суммарную аэродинамическую силу F и опрокидывающий момент M_{tip} относительно основания. Вместо аналитического интегрирования, которое ограничено случаями с постоянным коэффициентом лобового сопротивления, в вычислительном ядре применяется численное интегрирование скоростного напора $q(z_i)$ по методу трапеций. Это обеспечивает высокую точность и закладывает фундамент для учёта переменного по высоте аэродинамического сопротивления конструкции в будущих версиях модуля:

$$F = \sum_{i=1}^N q(z_i) \cdot \Delta z_i ; \quad (2)$$

$$M_{tip} = \sum_{i=1}^N z_i \cdot q(z_i) \cdot \Delta z_i, \quad (3)$$

где N – количество дискретных узлов по высоте сооружения.

Высота центра давления z_{cp} , представляющая собой точку приложения равнодействующей ветровой нагрузки [4], определяется алгоритмом как отношение опрокидывающего момента к суммарной силе:

$$z_{cp} = \frac{M_{tip}}{F}. \quad (4)$$

Расчёты параметров по формулам (2), (3), (4) отображены на рис. 2 в левом углу интерфейса как «Параметры устойчивости» [5–10].

Отличительной особенностью модуля, необходимой для генерации корректных граничных условий, является расчёт вертикального градиента скорости ветра $\frac{dV}{dz}$. Алгоритм аналитически дифференцирует закон Хеллмана по координате z , вычисляя для каждого узла сетки значение:

$$\frac{dV}{dz} = V_{ref} \cdot \frac{\alpha}{z_{ref}} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha-1}.$$

Этот градиент сдвига является фундаментальной характеристикой, определяющей интенсивность генерации турбулентности и касательные напряжения τ в вязкой среде согласно закону Ньютона, описанному в формуле (1) [11–13]. Визуализация смещения центра давления z_{cp} (штрихпунктирная линия на левом графике рис. 1) наглядно демонстрирует, как увеличение шероховатости местности α приводит к перераспределению аэродинамической нагрузки в верхнюю часть сооружения, что критически важно при проектировании фундаментов и несущих конструкций высотных объектов.

На рис. 3 показан график изменения градиента сдвига скорости ветра.

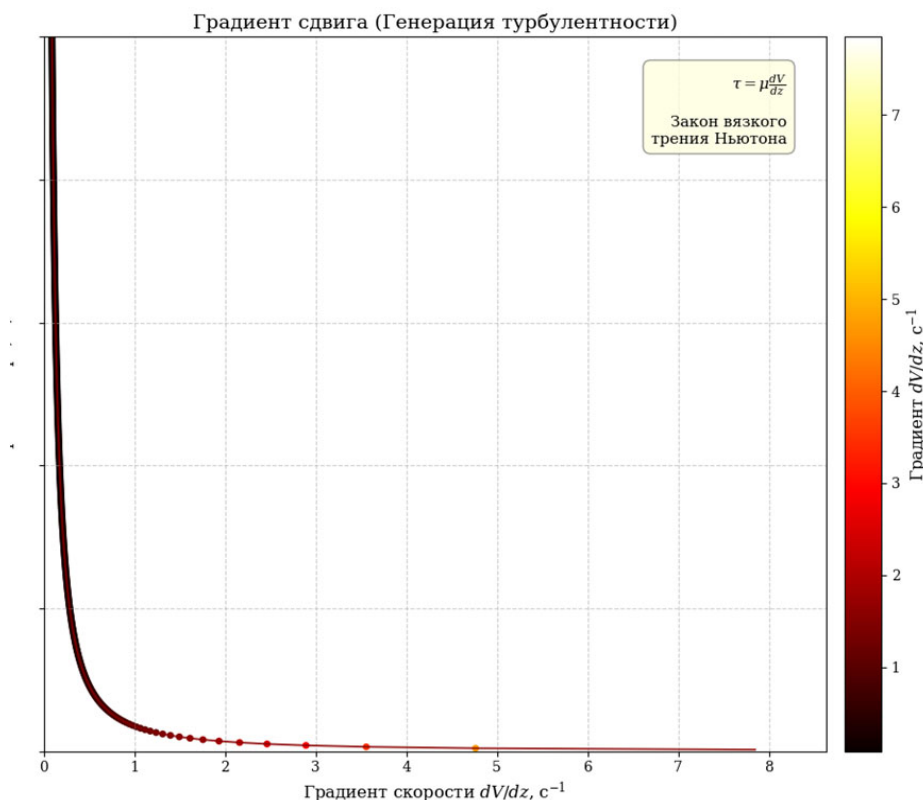


Рис. 3. График градиента сдвига при значении $\alpha = 0,28$



Заключение. В рамках проведённого исследования разработан программный модуль, предназначенный для численного анализа аэродинамического профиля ветра и градиента сдвига в приземном слое атмосферы. Интеграция степенного закона Хеллмана [14] и закона вязкого трения Ньютона в вычислительный алгоритм позволила создать физически обоснованный инструмент для оценки ветровых воздействий на высотные сооружения и башенные краны [15–20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Augustyn, M. and Barski, M. Numerical and Analytical Determination of the Critical Wind Speed Causing the Overturning of the Top-Slewing Tower Crane. *Applied Sciences*, 2025, 15, 4683. – P. 1-23.
2. Blocken, B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 2015, 91. – P. 219-236.
3. Chauhan, C.S.; Bhavsar, A.N. and Pitroda, J.R. Challenges in High-Rise Building Projects for Parameters of Project Management: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2022, 09(03). – P. 1940-1947.
4. Chen, W.; Qin, X. and Yang, Z. Study of the interference effect of building on the along-wind load of tower crane. *Proceedings of the 2019 International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering*, Changsha, China, 2019. – P. 14-16.
5. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. EN 1991-1-4:2005. Brussels: European Committee for Standardization, 2005. – 146 p.
6. Franke, J.; Hellsten, A.; Schlünzen, H. and Carissimo, B. Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment. *COST Action 732*, 2007. – 46 p.
7. Holmes, J.D. *Wind Loading of Structures*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. – 640 p.
8. ISO 4302:2016. *Cranes – Wind load assessment*. Geneva: International Organization for Standardization, 2016. – 22 p.
9. Karava, P.; Stathopoulos, T. and Athienitis, A. K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable facade elements. *Building and Environment*, 2011, 46(1). – P. 266-279.
10. Kwon, D. K. and Kareem, A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings. *Engineering Structures*, 2013, 51. – P. 23-35.
11. Li, Y. and Oldham, D. Wind tunnel and CFD studies of wind flow and pollutant dispersion around high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(12-15). – P. 1551-1569.
12. Murakami, S. Current status and future trends in computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74-76. – P. 3-34.
13. Ricci, M.; Patruno, L. and de Miranda, S. CFD simulations of wind flow and pressure coefficients on high-rise buildings. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44. – P. 102935.
14. Staffans, A. *Computational Fluid Dynamics in Building Design*. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2005. – 112 p.
15. Stathopoulos, T. The wind environment of buildings: implications in the design of wind-resistant structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(3). – P. 133-150.
16. Tamura, Y.; Yoshida, A. and Kikuchi, H. Wind tunnel tests and CFD simulations of wind flows around high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10-11). – P. 1851-1862.
17. Tominaga, Y. and Stathopoulos, T. Recent advances in computational wind engineering and its applications to urban environments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 122. – P. 1-15.
18. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow: Pearson Education, 2007. – 503 p.
19. Wang, H.; Liu, Y.; Xu, Z.; Mao, J. and Li, B. Wind-induced buffeting comfort assessment of tower cranes considering the wake effect of super-high towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2023, 240. – P. 105469.
20. Zhou, Y. and Kopp, G.A. CFD simulation of wind loads on high-rise buildings: A review. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50. – P. 104132.

REFERENCES

1. Augustyn, M. and Barski, M. Numerical and Analytical Determination of the Critical Wind Speed Causing the Overturning of the Top-Slewing Tower Crane. *Applied Sciences*, 2025, 15, 4683. – P. 1-23.

2. Blocken, B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 2015, 91. – P. 219-236.
3. Chauhan, C.S.; Bhavsar, A.N. and Pitroda, J.R. Challenges in High-Rise Building Projects for Parameters of Project Management: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2022, 09(03). – P. 1940-1947.
4. Chen, W.; Qin, X. and Yang, Z. Study of the interference effect of building on the along-wind load of tower crane. *Proceedings of the 2019 International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering*, Changsha, China, 2019. – P. 14-16.
5. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. EN 1991-1-4:2005. Brussels: European Committee for Standardization, 2005. – 146 p.
6. Franke, J.; Hellsten, A.; Schlünzen, H. and Carissimo, B. Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment. *COST Action 732*, 2007. – 46 p.
7. Holmes, J.D. *Wind Loading of Structures*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. – 640 p.
8. ISO 4302:2016. Cranes – Wind load assessment. Geneva: International Organization for Standardization, 2016. – 22 p.
9. Karava, P.; Stathopoulos, T. and Athienitis, A. K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable facade elements. *Building and Environment*, 2011, 46(1). – P. 266-279.
10. Kwon, D. K. and Kareem, A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings. *Engineering Structures*, 2013, 51. – P. 23-35.
11. Li, Y. and Oldham, D. Wind tunnel and CFD studies of wind flow and pollutant dispersion around high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(12-15). – P. 1551-1569.
12. Murakami, S. Current status and future trends in computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74-76. – P. 3-34.
13. Ricci, M.; Patruno, L. and de Miranda, S. CFD simulations of wind flow and pressure coefficients on high-rise buildings. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44. – P. 102935.
14. Staffans, A. *Computational Fluid Dynamics in Building Design*. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2005. – 112 p.
15. Stathopoulos, T. The wind environment of buildings: implications in the design of wind-resistant structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(3). – P. 133-150.
16. Tamura, Y.; Yoshida, A. and Kikuchi, H. Wind tunnel tests and CFD simulations of wind flows around high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10-11). – P. 1851-1862.
17. Tominaga, Y. and Stathopoulos, T. Recent advances in computational wind engineering and its applications to urban environments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 122. – P. 1-15.
18. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow: Pearson Education, 2007. – 503 p.
19. Wang, H.; Liu, Y.; Xu, Z.; Mao, J. and Li, B. Wind-induced buffeting comfort assessment of tower cranes considering the wake effect of super-high towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2023, 240. – P. 105469.
20. Zhou, Y. and Kopp, G.A. CFD simulation of wind loads on high-rise buildings: A review. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50. – P. 104132.



Носков С. И., Серёдкин С. П.
S. I. Noskov, S. P. Seredkin

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ
КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ СВЁРТКИ ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
С ЛИНЕЙНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ**

**APPLICATION OF EXPERT INFORMATION IN THE CONSTRUCTION
OF A PIECEWISE-LINEAR CONVOLUTION OF PARTIAL PERFORMANCE INDICATORS
WITH A LINEAR COMPONENT**

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.

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

Серёдкин Сергей Петрович – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: sseryodkin2008@yandex.ru.

Sergei P. Seredkin – PhD in Economic Sciences, Associate Professor, Information Systems and Information Security Department, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: sseryodkin2008@yandex.ru.

Аннотация. В статье рассматривается задача построения единой агрегированной оценки эффективности объектов на основе совокупности частных показателей. Предложен метод формирования кусочно-линейной свёртки с линейной составляющей, параметры которой идентифицируются по сравнительной экспертной информации, задаваемой матрицей парных предпочтений. В случае непротиворечивых экспертных суждений задача сводится к линейно-булеву программированию с максимизацией разрешающей способности неравенств, при наличии противоречий вводятся регуляризующие переменные и минимизируются искажения ограничений, что позволяет получить квазирешение. Численный пример демонстрирует работоспособность подхода, возможность выявлять конфликтующие пары объектов и ранжировать альтернативы в соответствии с заданными предпочтениями. Предложенный инструментарий может быть применён для оценки сложных технических, экономических и социальных систем.

Summary. The article discusses the task of building a unified aggregated assessment of the effectiveness of facilities based on a variety of specific indicators. A method for forming a piecewise linear convolution with a linear component is proposed, the parameters of which are identified by comparative expert information set by a matrix of paired preferences. In the case of consistent expert judgments, the problem is reduced to linear-Boolean programming with maximizing the resolution of inequalities. If contradictions are present, regularizing variables are introduced and constraint distortions are minimized, which makes it possible to obtain a quasi-solution. A numerical example demonstrates the efficiency of the approach, the ability to identify conflicting pairs of objects and rank alternatives according to given preferences. The proposed toolkit can be used to evaluate complex technical, economic, and social systems.

Ключевые слова: кусочно-линейная свёртка, линейная составляющая, частные показатели эффективности, экспертная информация, идентификация параметров, линейно-булево программирование, ранжирование объектов.

Key words: piecewise linear convolution, linear component, partial performance indicators, expert information, parameter identification, linear Boolean programming, object ranking.

УДК 519.852

Введение. В задачах оценки и сравнения сложных технических систем, объектов инфраструктуры или экономических процессов часто возникает необходимость приведения множества частных показателей (критериев) к единому скалярному показателю – агрегированной оценке.

Традиционно для этого используются свёртки различного типа, позволяющие учитывать относительную важность критериев через весовые коэффициенты.

В работе [1] рассматривается специальный класс многокритериальных задач квадратичного программирования транспортного типа, для которых предложены приближённые алгоритмы на основе лексикографической и аддитивной свёрток. В [2] исследуются необходимые и достаточные условия Парето-оптимальности для аддитивной свёртки, а также для обобщённых критериев на основе порядковых операторов взвешенного агрегирования. Показано, что не все метрики в целевом программировании гарантируют Парето-оптимальность. В статье [3] изучается разрешимость векторных задач дискретной оптимизации в классе алгоритмов линейной свёртки, приведены необходимые и достаточные условия, предложен алгоритм сведения к эквивалентной задаче.

В зарубежной литературе также активно развиваются методы скаляризации. В работе [4] исследуются взаимосвязи между собственно эффективностью и решениями обобщённой задачи скаляризации, установлены условия сохранения эффективности при преобразованиях целевых функций. В публикации [5] предложен алгоритм декомпозиции множества весов для трёхкритериальных смешанно-целочисленных задач на основе взвешенной суммы, работающий за выходное полиномиальное время. В [6] представлена модифицированная расширенная взвешенная скаляризация Чебышева для генерации полного эффективного множества решений дискретных многокритериальных задач.

Важным аспектом построения свёрток является учёт экспертной информации, позволяющий помочь определить весовые коэффициенты или иные параметры модели. В статье [7] предложено использовать экспертные оценки коэффициентов замещения показателей для получения весов линейной свёртки, что является менее субъективным подходом, чем прямое задание весов. В работе [8] рассматривается процедура оценки чувствительности оптимального решения при элементарных изменениях экспертных суждений на основе ранжирования критериев. В [9] метод линейной свёртки анализируется с позиций общей модели многокритериального выбора, особое внимание уделяется корректности его применения. Предложен комбинированный подход с предварительным сужением множества Парето на основе предпочтений лица, принимающего решения.

В [10] для нечёткого многокритериального анализа альтернатив группой экспертов применяется схема Беллмана-Заде с использованием интегрального критерия как нечёткой свёртки частных критериев, предложены подходы к согласованию оценок при противоречиях. В работе [11] описываются общие задачи многокритериальной оптимизации механических систем, анализируются различные подходы к формированию обобщённого критерия, обсуждаются их преимущества и недостатки. В публикации [12] представлена методика расчёта интегрального показателя эффективности обучения на основе экспертных методов. В статье [13] разработан эволюционный алгоритм WASF-GA, использующий функцию скаляризации достижений и учитывающий предпочтение лица, принимающего решения, через референтную точку.

Пусть эффективность некоторого класса объектов определяется m частными характеристиками x_j , $j = \overline{1, m}$. Поставим задачу их объединения в единый агрегат с целью формирования интегральной (обобщённой) функции (свёртки)

$$y = F(x_1, \dots, x_m), \quad (1)$$

позволяющей проводить сравнение и ранжирование объектов по уровню их эффективности.

При построении свёртки (1) будем использовать специальным образом заданную сравнительную экспертную информацию о группе объектов.

В работах [14; 15] описаны алгоритмы построения линейной

$$y = \sum_{j=1}^m \alpha_j x_j \quad (2)$$

и кусочно-линейной

$$y = \min_{j=1,m} \beta_j x_j \quad (3)$$

функций F , допускающие возможность взаимной противоречивости в экспертных высказываниях.

Поставим задачу построения комбинации свёрток (2) и (3), т. е. кусочно-линейной свёртки частных показателей эффективности с линейной составляющей:

$$y = \sum_{j \in J_1} \alpha_j x_j + \min_{j \in J_2} \beta_j x_j, \quad (4)$$

$$J_1 \cup J_2 = \{1, 2, \dots, m\},$$

где индексные множества J_1, J_2 заданы заранее.

Эта задача состоит в идентификации неизвестных параметров $\alpha_j, j \in J_1, \beta_j, j \in J_2$.

Пусть в распоряжении исследователя имеется набор эмпирических данных об эффективности n объектов, представленный в виде матрицы $X = ||x_{ij}||$, где каждый столбец фиксирует значения одного из m частных показателей, а каждая строка соответствует конкретному объекту. Таким образом, x_{ij} характеризует оценку j -го частного показателя эффективности для i -го объекта. Считаем, без потери общности, что все оценки принимают неотрицательные значения.

Пусть имеется эксперт (или группа экспертов), специализирующийся в области оценки эффективности объектов данного класса. Используя свои знания и опыт, он осуществляет попарное сравнение объектов по совокупному критерию эффективности. Итоги сравнения оформляются в виде квадратной матрицы $S = ||s_{kh}||$, где индексы k, h пробегают значения от 1 до n , а конкретные значения элементов определяются по правилу, изложенному в [16]:

$$s_{kh} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й объект не менее эффективен, чем } h\text{-й,} \\ -1, & \text{если } k\text{-й объект не более эффективен, чем } h\text{-й,} \\ 0, & \text{если объекты обладают сопоставимой эффективностью,} \\ \#, & \text{если эксперт затрудняется дать сравнительную оценку.} \end{cases}$$

Очевидно, что если $s_{kh} = 1$, то $s_{hk} = -1$, если $s_{kh} = 0$, то $s_{hk} = 0$, если $s_{kh} = \#$, то $s_{hk} = \#$. Элементы главной диагонали s_{kk} не заданы.

При построении свёртки (4) будем использовать вычислительные приёмы, применённые в работах [14–16].

Введём в рассмотрение непрерывные переменные $y_k, k = \overline{1, n}$ (вычисленные значения кусочно-линейной составляющей функции (4)) и булевы переменные $\sigma_{kj}, k = \overline{1, n}, j \in J_2$ (номера срабатываний минимумов на каждом объекте в соответствии с (4)):

$$y_k = \min_{j \in J_2} \beta_j x_{kj},$$

$$\sigma_{ki} = \begin{cases} 1, & (\beta_i x_{ki} \leq \beta_s x_{ks}, \forall s \neq i) \wedge (\beta_i x_{ki} < \beta_s x_{ks}, \forall s < i) \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Тогда, если экспертные высказывания, на основе которых сформирована матрица S , непротиворечивы, должна быть совместна следующая система равенств и неравенств:

$$y_k \leq \beta_j x_{kj}, k = \overline{1, n}, j \in J_2, \quad (5)$$

$$\beta_j x_{kj} - y_k \leq (1 - \sigma_{kj})D, k = \overline{1, n}, j \in J_2, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J_2} \sigma_{kj} = 1, k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J_1} \alpha_j (x_{kj} - x_{hj}) + y_k - y_h \geq 0, \quad (k, h): s_{kh} = 1, \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J_1} \alpha_j (x_{kj} - x_{hj}) + y_k - y_h = 0, (k, h): s_{kh} = 0, \quad (9)$$

$$y_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \alpha_j \geq 0, j \in J_1, \beta_j \geq 0, j \in J_2, \quad (10)$$

$$\sigma_{kj} \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, j \in J_2, \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^n \left(\sum_{j \in J_1} \alpha_j x_{kj} + y_k \right) = H, \quad (12)$$

где D – наперёд заданное большое положительное число. Равенство (12) исключает тривиальное решение задачи и придаёт расчётам заданный масштаб H .

Пусть экспертная информация, заключённая в матрице S , является взаимно непротиворечивой. Это будет означать совместность системы (5) – (12). Для нахождения единственного набора параметров $\alpha_j, j \in J_1, j \in J_2$ воспользуется традиционным в теории принятия решений приёмом [17], заключающимся в максимизации разрешающей способности системы неравенств (8). Заменим её на следующую:

$$\sum_{j \in J_1} \alpha_j (x_{kj} - x_{hj}) + y_k - y_h - u_{kh} \geq 0, (k, h): s_{kh} = 1, \quad (13)$$

$$u_{kh} \geq 0, (k, h): s_{kh} = 1. \quad (14)$$

Тогда задача построения свёртки (4) сведётся к задаче линейно-булева программирования (ЛБП) с ограничениями (5) – (7), (13), (14), (9) – (12) и целевой функцией

$$J_1 = \sum_{(k, h): s_{kh}=1} u_{kh} - \varepsilon \sum_{j \in J_2} \beta_j \rightarrow \max, \quad (15)$$

где ε – малая положительная константа. Второе слагаемое в (15) гарантирует единственность оценок параметров для случая, когда минимум в (4) ни разу не сработал на какой-либо частной характеристике.

Пусть теперь эта информация противоречива. Следствием этого будет несовместность системы (5) – (12). Тогда, по аналогии с, например, работой [18], будем искать квазирешение этой системы путём привнесения искажений в ограничения (8), (9), гарантирующих их выполнение, с последующей минимизацией этих искажений. Заменим эти ограничения на следующие:

$$\sum_{j \in J_1} \alpha_j (x_{kj} - x_{hj}) + y_k - y_h + u_{kh} \geq 0, (k, h): s_{kh} = 1, \quad (16)$$

$$\sum_{j \in J_1} \alpha_j (x_{kj} - x_{hj}) + y_k - y_h + b_{kh} - c_{kh} = 0, (k, h): s_{kh} = 0, \quad (17)$$

$$b_{kh} \geq 0, c_{kh} \geq 0, (k, h): s_{kh} = 0. \quad (18)$$

В этом случае задача построения кусочно-линейной свёртки частных показателей эффективности с линейной составляющей сведётся к задаче ЛБП (5) – (7), (16) – (18), (14), (10) – (12) и целевой функции

$$J_2 = \sum_{(k, h): s_{kh}=1} u_{kh} + \sum_{(k, h): s_{kh}=0} (b_{kh} + c_{kh}) + \varepsilon \sum_{j \in J_2} \beta_j \rightarrow \min. \quad (19)$$

Рассмотрим иллюстративный пример. Пусть $m = 4, n = 10, J_1 = \{1, 2\}, J_2 = \{3, 4\}, H = 100$. Сгенерированная случайным образом матрица X приведена в табл. 1.

Таблица 1

Объект	Матрица X			
	x_1	x_2	x_3	x_4
1	7	3	2	5
2	2	5	6	7
3	9	1	5	8
4	8	3	4	5
5	3	4	7	6
6	4	5	1	6
7	6	4	5	9
8	1	8	6	5
9	5	3	7	6
10	2	1	4	7

Предположим, что экспертами сформированы пары объектов, в которых первый не менее эффективен, чем второй ($s_{kh} = 1$): (7,3), (5,2), (6,9), (2,10), (4,5) а также пары с относительно равной эффективностью ($s_{kh} = 0$): (1,2), (8,6), (3,5), (7,10), (1,10).

Вначале проверим совместность системы (5) – (12). Поскольку она оказалась несовместной, оценим параметры свёртки (4) путём решения задачи ЛБП (5) – (7), (16) – (18), (14), (10) – (12), (19). В результате получим следующую агрегирующую функцию:

$$y = 0.27x_1 + 0.44x_2 + \min(6.1x_3, 1.12x_4). \quad (20)$$

При этом выяснилось, что экспертные высказывания, связанные с парами (5,2), (4,5), (1,2), (3,5), взаимно противоречивы, а сумма связанных с ними искажений неравенств (8), (9) равна 10.43.

Свёртка (20) позволяет упорядочить объекты по убыванию эффективности. Наивысшую её оценку имеет объект 7 (значение около 13.45), за ним следует объект 3 (около 11.83), затем – объект 2 (около 10.57). Объекты 1 и 10 получили практически равные оценки (около 8.81), что согласуется с экспертной парой (1,10) с $s = 0$. Объекты 6, 8 и 9 также имеют близкие значения (около 9.39), что дополнительно подтверждает пару (8,6) и косвенно согласуется с отсутствием строгих противоречий для объекта 9. Объект 5 (около 9.28) и объект 4 (около 9.08) замыкают рейтинг.

Анализ коэффициентов свёртки показывает, что характеристика x_2 вносит больший вклад в итоговую оценку, чем x_1 . Значения булевых переменных σ_{kj} позволяют заключить, что x_4 является доминирующим фактором в кусочно-линейной части для большей части выборки.

Кусочно-линейная свёртка частных показателей может успешно применяться для анализа социально-экономических систем и эффективности технических объектов, в частности, электроприводов [19], линий электропередач [20] и т. д.

Заключение. В работе предложен подход к построению кусочно-линейной свёртки частных показателей эффективности с линейной составляющей на основе сравнительной экспертной информации. Разработанные вычислительные схемы в форме задач линейно-булева программирования позволяют идентифицировать неизвестные параметры свёртки как в случае непротиворечивых, так и противоречивых экспертных суждений. Применение дополнительных переменных и критериев максимизации разрешающей способности или минимизации искажений обеспечивает единственность решения и устойчивость модели. Приведённый численный пример демонстрирует

работоспособность метода, возможность выявлять противоречия в экспертных оценках и ранжировать объекты. Предложенный инструментарий может быть полезен при решении прикладных задач оценки сложных технических и социально-экономических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прилуцкий. М. Х. Об одном классе многокритериальных задач квадратичного программирования транспортного типа / М. Х. Прилуцкий, Л. Г. Афраимович, М. С. Куликов // Вестник ННГУ. – 2009. – № 6-1. – С. 178-183.
2. Аристова, Е. М. Установление взаимосвязи между методами аддитивной свёртки и метрики / Е. М. Аристова // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 107-117.
3. Кравцов, М. К. Применение алгоритма линейной свёртки критериев для нахождения эффективных решений в векторной задаче дискретной оптимизации / М. К. Кравцов // Экономика, моделирование, прогнозирование. – 2021. – № 15. – С. 123-138.
4. Zamani M., Soleimani-damaneh M. Proper efficiency, scalarization and transformation in multi-objective optimization: unified approaches // Optimization. 2022. Vol. 71, No. 3. Pp. 753-774.
5. Halffmann P., Dietz T., Przybylski A., Ruzika S. An inner approximation method to compute the weight set decomposition of a triobjective mixed-integer problem // Journal of Global Optimization. 2020. Vol. 77. Pp. 715-742.
6. Holzmann T., Smith J.C. Solving discrete multi-objective optimization problems using modified augmented weighted Tchebychev scalarizations // European Journal of Operational Research. 2018. Vol. 271, No. 2. Pp. 436-449.
7. Анкудинов, Г. И. Мультикритериальный выбор решений на основе предельных уступок и коэффициентов замещения показателей / Г. И. Анкудинов, И. Г. Анкудинов // Записки Горного института. – 2014. – Т. 208. – С. 208-215.
8. Дмитриев, М. Г. Оценка чувствительности линейной свёртки частных критериев при экспертном определении весовых коэффициентов / М. Г. Дмитриев, В. А. Ломазов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – № 1. – С. 52-56.
9. Ногин, В. Д. Линейная свёртка критериев в многокритериальной оптимизации / В. Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – № 4. – С. 73-82.
10. Демидова, Л. А. Многокритериальный анализ альтернатив на основе схемы Беллмана-Заде и мультимножеств / Л. А. Демидова, В. В. Кираковский // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 5. – С. 9-14.
11. Гусейнов, Р. В. Некоторые вопросы многокритериальной оптимизации параметров сложных систем / Р. В. Гусейнов, М. Р. Гусейнова, К. А. Алиева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50. – № 2. – С. 67-75.
12. Латыпова, В. А. Оценка эффективности процесса обучения при наличии сложных открытых задач с помощью экспертных методов / В. А. Латыпова // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1 (40). – С. 35.
13. Ruiz A.B., Saborido R., Luque M. A preference-based evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the weighting achievement scalarizing function genetic algorithm // Journal of Global Optimization. 2015. Vol. 62, No. 1. Pp. 101-129.
14. Носков, С. И. Оценка уровня уязвимости объектов транспортной инфраструктуры: формализованный подход / С. И. Носков, В. А. Протопопов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 4 (32). – С. 241-244.
15. Носков, С. И. Построение кусочно-линейной свёртки частных показателей надёжности технических систем / С. И. Носков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2026. – № 6. – С. 1-6.
16. Агрегированный критерий оценки эффективности функционирования участков Улан-Баторской железной дороги / С. И. Носков, М. П. Базилевский, Ю. А. Трофимов, Архит Буяннэмэх // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 5 (39). – С. 159-164.
17. Васильев, С. Н. Синтез функции эффективности в многокритериальных задачах принятия решений / С. Н. Васильев, А. П. Селедкин // Известия АН СССР. Тех. кибернетика. – 1980. – № 3. – С. 186-190.
18. Носков, С. И. Точечная характеристика множеств решений интервальных систем линейных алгебраических уравнений / С. И. Носков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2018. – № 1 (1). – С. 8-13.
19. Моделирование многокаскадного нечёткого регулятора для управления многодвигательной системой электроприводов / С. П. Черный, К. А. Емельянов, М. А. Лямин, Д. Ю. Облогин // Учёные записки Комсо-



Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 4-10.

20. Эффективность использования автоматизированного расчёта аварийно допустимых токов в линиях электропередачи / А. Н. Кобылицкий, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, А. И. Пухова, А. А. Казакул // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III (59). – С. 21-26.

REFERENCES

1. Prilutsky M.Kh., Afraymovich L.G., Kulikov M.S. Ob odnom klasse mnogokriterialnykh zadach kvadraticnogo programmirovaniya transportnogo tipa [On a class of multi-criteria quadratic programming problems of transportation type]. Vestnik NNGU [Herald of UNN], 2009, no. 6-1, pp. 178-183. (In Russian)
2. Aristova E.M. Ustanovlenie vzaimosvyazi mezhdu metodami additivnoy svertki i metriki [Establishing the relationship between additive convolution methods and metrics]. Vestnik DGTU. Tekhnicheskie nauki [Herald of DSTU. Technical Sciences], 2017, no. 2, pp. 107-117. (In Russian)
3. Kravtsov M.K. Primenenie algoritma lineynoy svertki kriteriev dlya nakhozheniya effektivnykh resheniy v vektornoy zadache diskretnoy optimizatsii [Application of the linear criteria convolution algorithm for finding efficient solutions in a vector discrete optimization problem]. Ekonomika, modelirovanie, prognozirovanie [Economics, Modeling, Forecasting], 2021, no. 15, pp. 123-138. (In Russian)
4. Zamani M., Soleimani-damaneh M. Proper efficiency, scalarization and transformation in multi-objective optimization: unified approaches. Optimization, 2022, vol. 71(3), pp. 753-774.
5. Halffmann P., Dietz T., Przybylski A., Ruzika S. An inner approximation method to compute the weight set decomposition of a triobjective mixed-integer problem. Journal of Global Optimization, 2020, vol. 77, pp. 715-742.
6. Holzmann T., Smith J.C. Solving discrete multi-objective optimization problems using modified augmented weighted Tchebychev scalarizations. European Journal of Operational Research, 2018, vol. 271(2), pp. 436-449.
7. Ankudinov G.I., Ankudinov I.G. Multikriterialnyy vybor resheniy na osnove predelnykh ustupok i koeffitsientov zameshcheniya pokazateley [Multicriteria decision selection based on limit concessions and substitution coefficients of indicators]. Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute], 2014, vol. 208, pp. 208-215. (In Russian)
8. Dmitriev M.G., Lomazov V.A. Otsenka chuvstvitelnosti lineynoy svertki chastnykh kriteriev pri ekspertnom opredelenii vesovykh koeffitsientov [Sensitivity estimation of the linear convolution of partial criteria under expert determination of weight coefficients]. Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy [Artificial Intelligence and Decision Making], 2014, no. 1, pp. 52-56. (In Russian)
9. Nogin V.D. Lineynaya svertka kriteriev v mnogokriterialnoy optimizatsii [Linear convolution of criteria in multi-criteria optimization]. Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy [Artificial Intelligence and Decision Making], 2014, no. 4, pp. 73-82. (In Russian)
10. Demidova L.A., Kirakovskiy V.V. Mnogokriterialnyy analiz alternativ na osnove skhemy Bellmana-Zade i multimnozhestv [Multicriteria analysis of alternatives based on the Bellman-Zadeh scheme and multisets]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], 2006, no. S, pp. 9-14. (In Russian)
11. Guseynov R.V., Guseynova M.R., Alieva K.A. Nekotorye voprosy mnogokriterialnoy optimizatsii parametrov slozhnykh sistem [Some issues of multi-criteria optimization of complex system parameters]. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences], 2023, vol. 50, no. 2, pp. 67-75. (In Russian)
12. Latypova V.A. Otsenka effektivnosti protsessa obucheniya pri nalichii slozhnykh otkrytykh zadach s pomoshchyu ekspertnykh metodov [Evaluation of the learning process effectiveness in the presence of complex open problems using expert methods]. Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don], 2016, no. 1(40), p. 35. (In Russian)
13. Ruiz A.B., Saborido R., Luque M. A preference-based evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the weighting achievement scalarizing function genetic algorithm. Journal of Global Optimization, 2015, vol. 62(1), pp. 101-129.
14. Noskov S.I., Protopopov V.A. Otsenka urovnya uyazvimosti obektov transportnoy infrastruktury: formalizovanny podkhod [Assessment of the vulnerability level of transport infrastructure objects: a formalized approach]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2011, no. 4(32), pp. 241-244. (In Russian)
15. Noskov S.I. Postroenie kusochno-lineynoy svertki chastnykh pokazateley nadezhnosti tekhnicheskikh sistem [Construction of a piecewise-linear convolution of partial reliability indicators of technical systems]. Pribory i sis-

temy. Upravlenie, kontrol, diagnostika [Instruments and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics], 2026, no. 6, pp. 1-6. (In Russian)

16. Noskov S.I., Bazilevsky M.P., Trofimov Yu.A., Buyannemekh A. Agregirovannyi kriteriy otsenki effektivnosti funktsionirovaniya uchastkov Ulan-Batorskoy zheleznoy dorogi [Aggregated criterion for assessing the operational efficiency of sections of the Ulan-Bator railway]. Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik [South-Siberian Scientific Bulletin], 2021, no. 5(39), pp. 159-164. (In Russian)

17. Vasiliev S.N., Seledkin A.P. Sintez funktsii effektivnosti v mnogokriterialnykh zadachakh prinyatiya resheniy [Synthesis of the effectiveness function in multi-criteria decision-making problems]. Izvestiya AN SSSR. Tekh. kibernetika [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics], 1980, no. 3, pp. 186-190. (In Russian)

18. Noskov S.I. Tochehnaya kharakterizatsiya mnozhestv resheniy intervalnykh sistem lineynykh algebraicheskikh uravneniy [Point characterization of solution sets for interval systems of linear algebraic equations]. Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami [Information Technologies and Mathematical Modeling in Management of Complex Systems], 2018, no. 1(1), pp. 8-13. (In Russian)

19. Cherny S.P., Emelyanov K.A., Lyamin M.A., Oblogin D.Yu. Modelirovanie mnogokaskadnogo nechetkogo regulatora dlya upravleniya mnogodvigatelnoy sistemoy elektroprivodov [Modeling a multi-cascade fuzzy controller for controlling a multi-motor electric drive system]. Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Technical Sciences], 2025, no. III(83), pp. 4-10. (In Russian)

20. Kobylitsky A.N., Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Pukhova A.I., Kazakul A.A. Effektivnost ispolzovaniya avtomatizirovannogo rascheta avariyno dopustimykh tokov v liniyakh elektroperedachi [Efficiency of using automated calculation of emergency permissible currents in power transmission lines]. Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Technical Sciences], 2022, no. III(59), pp. 21-26. (In Russian)



Гренкин Г. В., Галимзянова К. Н.
G. V. Grenkin, K. N. Galimzyanova

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В РАМКАХ МОДЕЛИ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА

RECOVERY OF HEAT SOURCES FROM TEMPERATURE MEASUREMENTS WITHIN THE FRAMEWORK OF A COMPLEX HEAT TRANSFER MODEL

Гренкин Глеб Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и моделирования Владивостокского государственного университета (Россия, Владивосток); 690014, Приморский край, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41. E-mail: Gleb.Grenkin@vvsu.ru.

Gleb V. Grenkin – PhD in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Mathematics and Modeling Department, Vladivostok State University (Russia, Vladivostok); 690014, Primorsky Region, Vladivostok, 41, Gogolya St. E-mail: Gleb.Grenkin@vvsu.ru.

Галимзянова Ксения Наилевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и моделирования Владивостокского государственного университета (Россия, Владивосток); 690014, Приморский край, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41. E-mail: Kseniya.Galimzyanova@vvsu.ru.

Kseniya N. Galimzyanova – PhD in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Mathematics and Modeling Department, Vladivostok State University (Russia, Vladivostok); 690014, Primorsky Region, Vladivostok, 41, Gogolya St. E-mail: Kseniya.Galimzyanova@vvsu.ru.

Аннотация. Рассматривается стационарная модель сложного теплообмена, включающая в себя два дифференциальных уравнения: уравнение теплопроводности и диффузионное приближение уравнения переноса теплового излучения – с краевыми условиями третьего рода. Коэффициенты в правой части уравнения теплопроводности неизвестны. Требуется восстановить их, имея информацию о средней температуре в ряде подобластей. Для решения обратной задачи предлагается итерационный метод, монотонно сходящийся к решению. Монотонность достигается за счёт выбора специальной системы координат и обеспечивает отсутствие перегрева измерителей в процессе медленного нагрева источников. Предлагается эффективный способ реализации метода конечных разностей с помощью блочного конструктора конечно-разностных алгоритмов.

Summary. The paper considers a stationary model of complex heat transfer, which includes two differential equations: the heat conduction equation and the diffusion approximation of the thermal radiation transfer equation – with third-type boundary conditions. The coefficients on the right-hand side of the heat conduction equation are unknown. The goal is to recover them using information about the average temperature in a number of subdomains. To solve the inverse problem, an iterative method is proposed that converges monotonically to the solution. The monotonicity is achieved by choosing a special coordinate system and ensures that the sensors do not overheat during the slow heating of the sources. An efficient approach to implementing the finite difference method is proposed, using a block-based constructor of finite-difference algorithms.

Ключевые слова: обратная задача, радиационный теплообмен, диффузионное приближение, метод конечных разностей.

Key words: inverse problem, radiative heat transfer, diffusion approximation, finite difference method.

УДК 517.95

Введение. В технических и медицинских приложениях возникают задачи нагрева определённых геометрических областей до заданных температур при условии, не допускающем локального перегрева. В рамках линейной модели теплопроводности задача сводится к линейным алгебраическим уравнениям и легко решается. В то же время, если учитывать тепловое излучение, модель становится нелинейной. Соотношение между мощностями тепловых источников и темпера-

турами измерителей выражается в виде нелинейных алгебраических уравнений. Для моделирования медленного нагрева целесообразно использование итерационного процесса, обеспечивающего монотонную сходимость, что позволяет исключить перегрев измерителей. Монотонность будет обеспечена, если выбрать подходящую косоугольную систему координат и применить для настройки мощностей источников метод простой итерации. В настоящей работе предложен алгоритм для оптимального выбора системы координат. Также рассмотрен вопрос эффективной программной реализации метода конечных разностей с помощью блочного конструктора.

Для моделирования теплообмена за счёт теплопроводности и теплового излучения применим диффузионное приближение для уравнения переноса излучения. Тогда модель сложного теплообмена, описывающая стационарное состояние теплового процесса, примет вид системы двух дифференциальных уравнений эллиптического типа. В качестве правой части уравнения теплопроводности выступает тепловой источник, заданный с точностью до коэффициентов мощности отдельных тепловых источников, которые нужно восстановить. В качестве дополнительных условий задаются значения средней температуры измерителей. Получаем обратную задачу восстановления мощностей источников по заданным температурным измерениям.

Обратные задачи восстановления тепловых источников для уравнений сложного теплообмена рассматривались в работах [1–8]. Статьи [1; 4; 6; 8] посвящены анализу обратных задач для стационарных уравнений сложного теплообмена. В работах [2; 3; 5; 7] изучены аналогичные задачи для нестационарных уравнений. С теоретической точки зрения единственность восстановления тепловых источников в стационарной модели сложного теплообмена является открытым вопросом.

Обратная задача. Сложный теплообмен в области Ω с границей Γ подчиняется следующей системе уравнений:

$$-a\Delta\theta + b\kappa_a(|\theta|^3\theta - \varphi) = \sum_{i=1}^m q_i f_i, \quad (1)$$

$$-\alpha\Delta\varphi + \kappa_a(\varphi - |\theta|^3\theta) = 0 \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$a\frac{\partial\theta}{\partial n} + \beta(\theta - \theta_b) = 0, \quad \alpha\frac{\partial\varphi}{\partial n} + \gamma(\varphi - \theta_b^4) = 0, \quad (3)$$

где θ – поле нормализованной температуры; φ – поле нормализованной интенсивности излучения, усреднённой по всем направлениям. Положительные параметры a , b , α , κ_a характеризуют радиационно-термические свойства среды, а граничные функции β , γ – отражающие свойства границы. Через $\partial/\partial n$ обозначена производная по направлению внешней нормали.

Коэффициенты q_i имеют смысл мощностей тепловых источников с пространственными плотностями f_i . Считаем, что $f_i \geq 0$. Для нахождения коэффициентов зададим интегральное переопределение:

$$F_j(q) \equiv \int_{\Omega} g_j(x)\theta(x)dx = r_j, \quad (4)$$

где g_j – неотрицательные функции; r_j – заданные числа. Приходим к обратной задаче нахождения чисел q_i по известным значениям r_j .

Анализ обратной задачи. Компоненты градиента функции $F_j(q)$ определяются по формуле

$$\frac{\partial F_j(q)}{\partial q_i} = (g_j, P[\theta(q)]f_i),$$

где $P[\theta]$ – оператор, отображающий функцию h в функцию $u = P[\theta]h$, которая является первой компонентой решения $\{u, z\}$ линеаризованной системы

$$-a\Delta u + b\kappa_a(4|\theta|^3u - z) = h, \quad -\alpha\Delta z + \kappa_a(z - 4|\theta|^3u) = 0 \quad \text{в } \Omega,$$

$$a \frac{\partial u}{\partial n} + \beta u = 0,$$

$$\alpha \frac{\partial z}{\partial n} + \gamma z = 0$$

на Γ .

Определим в пространстве Соболева $H^1(\Omega)$ операторы A_1, A_2 согласно формулам

$$(A_1 u, v) = a(\nabla u, \nabla v) + \int_{\Gamma} \beta u v d\Gamma, \quad (A_2 u, v) = \alpha(\nabla u, \nabla v) + \int_{\Gamma} \gamma u v d\Gamma.$$

Также определим функционалы h_1, h_2 согласно формулам

$$(h_1, v) = \int_{\Gamma} \beta \theta_b v d\Gamma, \quad (h_2, v) = \int_{\Gamma} \gamma \theta_b^4 v d\Gamma.$$

Введём оператор $Q[\theta]$, отображающий функцию h в функцию $Q[\theta]h = A_1^{-1}A_2 z$, где z – вторая компонента решения линеаризованной системы с правой частью h .

Введём функции $G_j(q) = (g_j, A_1^{-1}(A_2 \varphi(q) - h_2))$ и $S_j(q) = F_j(q) + bG_j(q)$.

Заметим, что

$$\frac{\partial G_j(q)}{\partial q_i} = (g_j, Q[\theta(q)]f_i), \quad \frac{\partial S_j(q)}{\partial q_i} = (g_j, A_1^{-1}f_i).$$

Преобразование $S_j(q)$ задаёт новую косоугольную систему координат $\{s_j\}$ в m -мерном пространстве. В указанных координатах определим функции: $\tilde{F}_j(s) = F_j(q(s))$, $\tilde{G}_j(s) = G_j(q(s))$.

Рассмотрим случай $m = 2$. Предположим, что источники и измерители упорядочены таким образом, что пара векторов $\nabla S_k, \nabla S_j$ положительно ориентирована в координатах (q_k, q_j) . Рассмотрим три случая взаимного расположения векторов $\nabla F_k, \nabla S_k, \nabla S_j$.

1. Пара векторов $\nabla F_k, \nabla S_k$ положительно ориентирована: $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_k} > 0, \frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j} < 0$.
2. Пара векторов $\nabla F_k, \nabla S_k$ отрицательно ориентирована, и пара векторов $\nabla F_k, \nabla S_j$ положительно ориентирована: $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_k} > 0, \frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j} > 0$.
3. Пара векторов $\nabla F_k, \nabla S_j$ отрицательно ориентирована: $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_k} < 0, \frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j} > 0$.

Заметим, что в первом и третьем случаях линия уровня функции $\tilde{F}_k$ в координатах (s_k, s_j) является возрастающей функцией, в то время как во втором случае линия уровня функции $\tilde{F}_k$ представляет собой убывающую функцию.

Из результатов [9, 424] следует монотонная сходимост метода простой итерации к минимальному решению системы $F_j(q) = r_j$ при выполнении условий $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_k} \leq 1, \frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j} \leq 0$. Таким образом, если обеспечить условие $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j} \leq 0$ во всех допустимых точках q области мощностей источников, то решение нелинейной системы может быть найдено с помощью монотонно сходящегося метода простой итерации. Поставим задачу наилучшего выбора косоугольной системы координат для ускорения сходимости.

Постановка экстремальной задачи. Поставим задачу выбора такой системы координат $\{s_j\}$, чтобы обеспечить выполнение условия $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j} \leq 0$ и при этом величины $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j}$ были как можно ближе к нулю в области допустимых мощностей источников.

Зададим область $Q = \{q: 0 \leq q_i \leq q_i^{\max}\}$ и выберем в ней множество точек коллокации $p_k \in Q$. Определим целевую функцию на множестве матриц S с элементами $\{s_{ij}\}$:

$$J(S) = \|S\|^2 \sum_k \sum_{i \neq j} \delta_c \left(\frac{\partial \tilde{F}_j(p_k)}{\partial s_i} \right). \quad (5)$$

Численные значения производных $\frac{\partial \tilde{F}_j}{\partial s_i}$ определяются из решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} s_{11}y_1 + s_{21}y_2 + \dots + s_{m1}y_m &= \frac{\partial F_j(q)}{\partial q_1}, \\ s_{12}y_1 + s_{22}y_2 + \dots + s_{m2}y_m &= \frac{\partial F_j(q)}{\partial q_2}, \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ s_{1m}y_1 + s_{2m}y_2 + \dots + s_{mm}y_m &= \frac{\partial F_j(q)}{\partial q_m}. \end{aligned}$$

Тогда $\frac{\partial \tilde{F}_j(s)}{\partial s_i} = y_i$, где $(y_1, y_2, \dots, y_m)$ – решение системы.

Функция δ_c оценивает величину своего аргумента с учётом штрафа за его положительные значения:

$$\delta_c(z) = \begin{cases} z^2, & \text{если } z \leq 0 \\ cz^2, & \text{если } z > 0 \end{cases}$$

где c – параметр (число, значительно большее 1).

Отметим, что после выбора матрицы S связь между координатами $\{q_i\}$ и $\{s_j\}$ имеет следующий вид: $s = Sq$. Множитель $\|S\|^2$, где $\|S\|$ – норма Фробениуса матрицы S , в формуле (5) добавлен в качестве нормировки.

Таким образом, приходим к экстремальной задаче нахождения матрицы S , обеспечивающей минимум функции J . Оптимальная система координат обеспечит условие $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j} \leq 0$, максимально приближая к нулю значения функции $\frac{\partial \tilde{F}_k}{\partial s_j}$ в узлах коллокации. Эту систему координат можно будет использовать для численного решения обратной задачи (1) – (4).

Метод простой итерации с преобразованием координат (предобуславливанием) имеет следующий вид:

$$s_j^{(k+1)} = s_j^{(k)} + \lambda_k (r_j - \tilde{F}_j(s^{(k)})),$$

где λ_k – положительный параметр, который подбирается, например, из условия $\tilde{F}_j(s^{(k+1)}) = r_j$ или при $\lambda_k = 1 / \left(\frac{\partial \tilde{F}_j(s^{(k)})}{\partial s_j} \right)$. Для обеспечения условия $\frac{\partial \tilde{F}_j}{\partial s_j} > 0$ нужно соответствующим образом выбрать порядок источников f_i и соответствующих им измерителей g_j .

В качестве начального приближения для решения экстремальной задачи выбирается система координат, определяемая матрицей с элементами $s_{ji} = (g_j, \tilde{A}_1^{-1} f_i)$, где $\tilde{A}_1$ – линейный оператор, определяемый формулой $(\tilde{A}_1 u, v) = a(\nabla u, \nabla v) + \int_{\Gamma} \tilde{\beta} u v d\Gamma$, здесь $\tilde{\beta} = \min\{\beta, a\gamma/\alpha\}$. Выбор системы координат обусловлен тем, что условие $\frac{\beta}{a} \leq \frac{\gamma}{\alpha}$ является благоприятным для выполнения условия монотонности изолиний.

Блочный конструктор конечно-разностных алгоритмов. Рассмотрим проблему программной реализации численного решения системы дифференциальных уравнений диффузии-реакции. Особенность системы – нелинейность в реакционном слагаемом. Геометрическая область моделирования представляет собой прямоугольник, разделённый на множество прямоугольных подобластей. На границе области задаются краевые условия первого, второго или третьего рода. На границах раздела подобластей ставятся условия сопряжения, которые могут соответствовать как идеальному (непрерывность решения и потока), так и неидеальному (наличие скачка) контакту.

Обобщённая постановка задачи предоставляет единый инструмент для класса однотипных систем уравнений, что позволяет избежать разработки отдельной программы для каждой вариации задачи.

Несмотря на наличие предметно ориентированных языков для численного решения дифференциальных уравнений [10–12], их применение к нестандартным постановкам задач зачастую требует значительной доработки синтаксиса, ручного программирования специфических разностных схем, дополнительных затрат на валидацию. В связи с этим актуальна разработка упрощённого решателя, способного эффективно работать с нестандартными постановками, обеспечивать гибкость за счёт модульной структуры, поддерживать валидацию на задачах с известным точным решением.

Структура алгоритма [13] основана на представлении разностных уравнений в виде суммы одномерных разностных операторов по пространственным переменным и нелинейного точечного оператора. Это позволяет унифицировать обработку различных типов узлов расчётной сетки: внутренние узлы области; узлы на сторонах прямоугольника; угловые точки; узлы на границах раздела подобластей. На основе операторов формируются блоки генерации системы линейных уравнений. Ключевым преимуществом предлагаемого подхода является возможность переопределения указанных блоков при использовании нестандартных разностных схем, что существенно повышает гибкость программной реализации.

Таким образом, предложенный подход отличается универсальностью благодаря обобщённой постановке задачи, гибкостью за счёт модульной структуры алгоритма и возможностью верификации на тестовых примерах.

Результаты вычислительных экспериментов. В качестве примера выберем следующие исходные данные для одномерной области (слоя) толщиной $L = 50$. Коэффициенты примерно соответствуют физическим параметрам воздуха: $a = 0.92$, $b = 18.7$, $\kappa_a = 0.01$, $\alpha = 3.3$, $\beta = 10$, $\gamma = 0.3$, $\theta_b(0) = 0.4$, $\theta_b(L) = 0.8$. Определим два источника по формулам $f_1(x) = f_{10,20}(x)$, $f_2(x) = f_{35,45}(x)$, где $f_{l,r}(x) = 2(x - a)/(b - a)$ при $x \in [l, (l + r)/2]$, $f_{l,r}(x) = 2(b - x)/(b - a)$ при $x \in [(l + r)/2, r]$ и $f_{l,r}(x) = 0$ иначе. Определим два измерителя по формулам $g_1(x) = f_{20,35}(x)$, $g_2(x) = f_{35,40}(x)$. Сетка включает 71 узел. В качестве узлов коллокации выбраны узлы прямоугольной сетки 5×5 , построенной на квадрате $Q = [0, 2] \times [0, 2]$. Параметр c в штрафной функции равен 1000. Вычисления реализованы в пакете Octave методом конечных разностей [14]. Для оптимизации целевой функции J используется встроенная функция `fsolve` пакета Octave.

Визуализируем линии уровня функций $\tilde{F}_j$ в найденной системе координат $\{s_j\}$ (см. рис. 1). На рисунке пропущены точки, где нормализованная абсолютная температура θ достигает отрицательных значений. Узлы коллокации выделены чёрными кружками.

Найденная система координат задаётся матрицей

$$S = \begin{pmatrix} 480.9 & 457.5 \\ 48.5 & 245.7 \end{pmatrix}.$$

Линии уровня на рис. 1 выражаются монотонными функциями и близки к линиям прямоугольной координатной сетки, что обеспечивает быструю сходимость метода простой итерации. По сравнению с методом Ньютона решения нелинейных алгебраических систем метод простой итерации не требует вычисления якобиана отображения F_j для каждого нового приближения (если зафиксировать параметр λ_k). Это упрощает встраивание линейного механизма в систему управления в реальном времени.

Выводы. Для управления нелинейной системой может быть использован итерационный процесс, состоящий в повторении воздействия линейной системы управления при условии, что последняя не приводит к нарушению свойств управляемой системы (например, к перегреву, как в случае управления теплообменом).

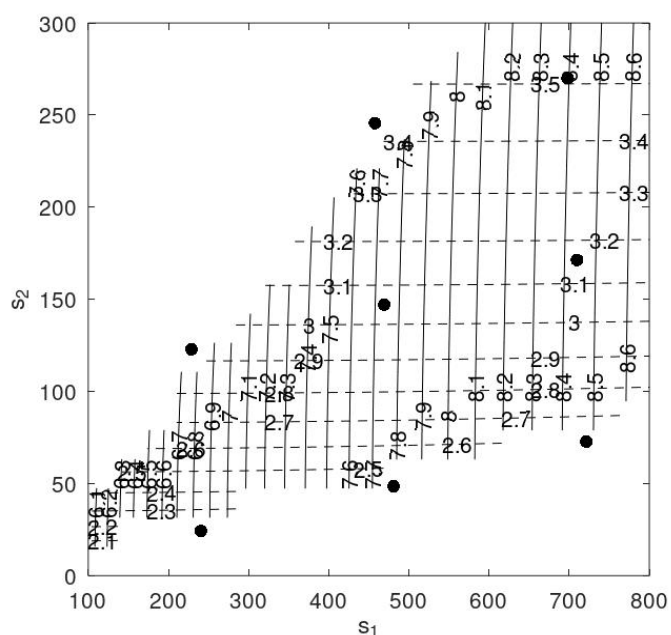


Рис. 1. Линии уровня функций $\tilde{F}_j$ в найденной системе координат s_1, s_2
(сплошная линия – $j = 1$, штриховая линия – $j = 2$)

В настоящей работе для построения наилучшей линейной управляющей системы применяется оптимизационный метод. С его помощью находится косоугольная система координат, такая, что при управлении нагревом источников не возникает перегрев измерителей. Найденная система координат может быть встроена в линейную систему управления.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на обобщение предложенного подхода к анализу других систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Inverse problem with finite overdetermination for steady-state equations of radiative heat exchange / A. Y. Chebotarev, G. V. Grenkin, A. E. Kovtanyuk [et al.] // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 2018. – Vol. 460, No. 2. – P. 737-744.
2. Chebotarev, A. Y. An inverse problem for a quasi-static approximate model of radiative heat transfer / A. Y. Chebotarev, R. Pinnau // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 2019. – Vol. 472, No. 1. – P. 314-327.
3. Гренкин, Г. В. Обратная задача для уравнений сложного теплообмена / Г. В. Гренкин, А. Ю. Чеботарев // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2019. – Т. 59. – № 8. – С. 1420-1430.
4. Чеботарев, А. Ю. Обратная задача для уравнений сложного теплообмена с френелевскими условиями сопряжения / А. Ю. Чеботарев // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2021. – Т. 61. – № 2. – С. 303-311.
5. Chebotarev, A. Inverse problem with unknown sources for a quasi-linear complex heat transfer model / A. Chebotarev, P. Mesenev, A. Kovtanyuk // 2023 Days on Diffraction (DD), St.Petersburg, Russian Federation, 05-09 июня 2023 года. – St.Petersburg, Russian Federation: IEEE, 2023. – P. 31-35.
6. Гренкин, Г. В. Единственность решения обратной задачи для модели сложного теплообмена / Г. В. Гренкин // Сибирские электронные математические известия. – 2024. – Т. 21. – № 1. – С. 98-104.
7. Гренкин, Г. В. Управление нагревом области в рамках модели сложного теплообмена / Г. В. Гренкин // Информатика и системы управления. – 2024. – № 1 (79). – С. 121-125.
8. Гренкин, Г. В. Идентификация тепловых источников в модели сложного теплообмена / Г. В. Гренкин // Дальневосточный математический журнал. – 2024. – Т. 24. – № 2. – С. 170-177.
9. Ортега, Дж. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными / Дж. Ортега, В. Рейнболдт. – М.: Мир, 1975. – 558 с.



10. Rathgeber, F. Firedrake: automating the finite element method by composing abstractions / F. Rathgeber, D. A. Ham, L. Mitchell [et al.] // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). – 2016. – Vol. 43, No. 3. – P. 1-27.
11. Louboutin, M. Devito (v3.1.0): an embedded domain-specific language for finite differences and geophysical exploration / M. Louboutin, M. Lange, F. Luporini [et al.] // Geoscientific Model Development. – 2019. – Vol. 12, No. 3. – P. 1165-1187.
12. Saad, T. uPDE: A Python library for solving systems of nonlinear partial differential equations / T. Saad // SoftwareX. – 2026. – Vol. 34. – P. 102715.
13. Object-oriented constructor of finite difference schemes // GitHub: сайт. – URL: <https://github.com/grenkin/joker-fdm> (дата обращения: 11.08.2026). – Текст: электронный.
14. Inverse problems of radiative heat transfer // GitHub: сайт. – URL: <https://github.com/lapkin25/heat-inverse> (дата обращения: 12.08.2026). – Текст: электронный.

REFERENCES

1. Chebotarev A.Y., Grenkin G.V., Kovtanyuk A.E., et al. Inverse problem with finite overdetermination for steady-state equations of radiative heat exchange. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2018, vol. 460, no. 2, pp. 737-744.
2. Chebotarev A.Y., Pinnau R. An inverse problem for a quasi-static approximate model of radiative heat transfer. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2019, vol. 472, no. 1, pp. 314-327.
3. Grenkin G.V., Chebotarev A.Yu. Obratnaya zadacha dlya uravneniy slozhnogo teploobmena [Inverse problem for complex heat transfer equations]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 2019, vol. 59, no. 8, pp. 1420-1430. (In Russian)
4. Chebotarev A.Yu. Obratnaya zadacha dlya uravneniy slozhnogo teploobmena s frenelevskimi usloviyami sopryazheniya [Inverse problem for complex heat transfer equations with Fresnel conjugation conditions]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 2021, vol. 61, no. 2, pp. 303-311. (In Russian)
5. Chebotarev A., Mesenev P., Kovtanyuk A. Inverse problem with unknown sources for a quasi-linear complex heat transfer model. 2023 Days on Diffraction (DD), St. Petersburg, Russian Federation, 05–09 June 2023. St. Petersburg, Russian Federation: IEEE, 2023, pp. 31-35.
6. Grenkin G.V. Edinstvennost resheniya obratnoy zadachi dlya modeli slozhnogo teploobmena [Uniqueness of the solution of the inverse problem for a complex heat transfer model]. *Sibirskie elektronnyye matematicheskie izvestiya* [Siberian Electronic Mathematical Reports], 2024, vol. 21, no. 1, pp. 98-104. (In Russian)
7. Grenkin G.V. Upravlenie nagrevom oblasti v ramkakh modeli slozhnogo teploobmena [Control of domain heating within the framework of a complex heat transfer model]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and Control Systems], 2024, no. 1(79), pp. 121-125. (In Russian)
8. Grenkin G.V. Identifikatsiya teplovykh istochnikov v modeli slozhnogo teploobmena [Identification of heat sources in a complex heat transfer model]. *Dalnevostochnyy matematicheskiy zhurnal* [Far Eastern Mathematical Journal], 2024, vol. 24, no. 2, pp. 170-177. (In Russian)
9. Ortega J.M., Rheinboldt W.C. Iteratsionnyye metody resheniya nelineynykh sistem uravneniy so mnogimi neizvestnymi [Iterative methods for solving nonlinear systems of equations with many unknowns]. Moscow, Mir Publ., 1975. 558 p. (In Russian)
10. Rathgeber F., Ham D.A., Mitchell L., et al. Firedrake: automating the finite element method by composing abstractions. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 2016, vol. 43, no. 3, pp. 1-27.
11. Louboutin M., Lange M., Luporini F., et al. Devito (v3.1.0): an embedded domain-specific language for finite differences and geophysical exploration. *Geoscientific Model Development*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 1165-1187.
12. Saad T. uPDE: A Python library for solving systems of nonlinear partial differential equations. *SoftwareX*, 2026, vol. 34, p. 102715.
13. Object-oriented constructor of finite difference schemes. GitHub. Available at: <https://github.com/grenkin/joker-fdm> (accessed 11 August 2026).
14. Inverse problems of radiative heat transfer. GitHub. Available at: <https://github.com/lapkin25/heat-inverse> (accessed 12 August 2026).

Трещев И. А., Малаховец А. И., Монастырная Е. И.
I. A. Treshchev, A. I. Malakhovets, E. I. Monastyrnaya

О ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ СОБЫТИЙНОЙ МОДЕЛИ СЦЕНАРИЕВ АТАК ЗЛОУМЫШЛЕННИКОВ

ON APPROACH TO BUILDING AN EVENT-DRIVEN MODEL OF MALICIOUS ATTACK SCENARIOS

Трещев Иван Андреевич – кандидат технических наук, доцент, декан факультета компьютерных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)175-91-62. E-mail: kalkt@yandex.ru.

Ivan A. Treshchev – PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of Computer Technologies Faculty, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)175-91-62. E-mail: kalkt@yandex.ru.

Малаховец Алина Ильинична – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(924)317-77-85. E-mail: malahovecalina@gmail.com.

Alina I. Malakhovets – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(924)317-77-85. E-mail: malahovecalina@gmail.com.

Монастырная Елизавета Игоревна – инженер баз данных в отделе информационных технологий Городской Централизованной Библиотеки (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)429-71-20. E-mail: liza.monastyrnaya@mail.ru.

Elizaveta I. Monastyrnaya – Database Engineer, Information Technology Department, City Centralized Library System (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)429-71-20. E-mail: liza.monastyrnaya@mail.ru.

Аннотация. Статья посвящена разработке подхода к формальному описанию и моделированию сценариев атак злоумышленников на информационные системы. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания единого языка описания поведения нарушителя, пригодного для анализа причинно-следственных связей между этапами атаки, оценки возможных путей развития инцидента и автоматизации процессов обнаружения вторжений. В качестве базового математического аппарата используются РТ-ограниченные сети Петри, позволяющие наглядно представить последовательные и параллельные ветвления событий, а также синхронизацию процессов через общие ресурсы. Практическая применимость подхода демонстрируется на трёх характерных примерах: фишинговой атаке на сотрудников с целью получения учётных данных и последующей эскалации привилегий; установке бэкдора через заражённый файл с альтернативными ветвями развития (использование легитимных средств Windows, отключение антивируса, сканирование сети); эксплуатации уязвимости SQL-инъекции в веб-приложении с тремя независимыми сценариями пост-эксплуатации.

Summary. The article is devoted to the development of an approach to the formal description and modeling of scenarios of attacks by intruders on information systems. The relevance of the study is due to the need to create a unified language for describing the behavior of an intruder, suitable for analyzing the cause-and-effect relationships between the stages of an attack, assessing possible ways to develop an incident, and automating intrusion detection processes. PT-limited Petri nets are used as the basic mathematical apparatus, which make it possible to visualize sequential and parallel branching of events, as well as synchronization of processes through shared resources. The practical applicability of the approach is demonstrated by three characteristic examples: a phishing attack on employees in order to obtain credentials and then escalate privileges; installing a backdoor through an infected file with alternative development branches (using legitimate Windows tools, disabling antivirus, network scanning); exploiting an SQL injection vulnerability in a web application with three independent post-exploitation scenarios.

Ключевые слова: сети Петри, моделирование атак, событийная модель, поведение злоумышленника, формальная нотация, каналы связи, параллельные процессы, фишинг, бэкдор, SQL-инъекция.

Key words: Petri nets, attack modeling, event-driven model, attacker behavior, formal notation, communication channels, parallel processes, phishing, backdoor, SQL injection.

УДК 004.942

Введение. Обеспечение информационной безопасности современных автоматизированных систем требует не только пассивных методов защиты, но и активного анализа потенциальных угроз [1]. Одним из ключевых направлений в этой области является моделирование поведения злоумышленника [2] – построение формальных описаний сценариев атак, позволяющих выявлять уязвимые места [3], оценивать риски [14] и разрабатывать эффективные меры противодействия. Существующие подходы, основанные на графах атак [4; 5], деревьях решений [9] или статистических методах [11], часто не дают единой нотации, пригодной одновременно для ручного анализа экспертами и для автоматической обработки, а также не всегда учитывают параллелизм, синхронизацию и вариативность действий нарушителя [7].

В работах [12; 13] авторами был предложен событийно-формальный подход к описанию поведения злоумышленника, базирующийся на аппарате сетей Петри [8, 15]. Данный подход позволяет наглядно представить причинно-следственные связи между отдельными действиями, но не учитывает необходимость передачи информации между этапами атаки.

Моделирование сценариев атак. Поведение злоумышленника в информационной системе будем описывать в виде совокупности процессов, взаимодействующих посредством каналов, по которым эти процессы обмениваются данными. При этом все каналы являются однонаправленными, каждый из них предназначен исключительно для передачи сообщения в одном направлении – либо только для отправки, либо только для приёма, но не совмещает обе функции. Выделим отдельный стартовый процесс S , соответствующий этапу рекогносцировки, и конечный процесс Fin , который направлен на сокрытие факта компрометации системы (удаление логов, временных файлов, инструментов атаки и вредоносных программ, чтобы скрыть факт проникновения и затруднить форензику). Данный подход является расширением предложенной в [13] идеи формального описания поведения злоумышленника.

Для описания обмена данными между процессами введём следующие синтаксические конструкции:

- $P.\langle a \rangle$ – процесс P выполняется, после чего по каналу $\langle a \rangle$ отправляется сообщение.
- $(a).P$ – процесс ожидает поступления сообщения из канала (a) , и как только оно получено, запускается процесс P .

При этом стартовый процесс S служит только для первичной рассылки сообщений и считается завершённым сразу после отправки.

Продemonстрируем работу этого механизма на простом примере взаимодействия двух процессов.

Процесс 1:

$$P = A.\langle a \rangle.(b).B.$$

Сначала выполняется действие A , затем в канал $\langle a \rangle$ отправляется сообщение, после чего процесс переходит в режим ожидания сообщения из канала (b) , и по его получении запускается B .

Процесс 2:

$$Q = (a).C.\langle b \rangle.$$

Процесс Q ожидает сообщение из канала (a) , затем выполняет C и отправляет сообщение в канал $\langle b \rangle$.

Параллельное выполнение P и Q предполагает, что процессы могут исполняться независимо друг от друга:

$$P \parallel Q = (A.\langle a \rangle.(b).B) \parallel ((a).C.\langle b \rangle).$$

В этом случае обмен сообщениями происходит через каналы (a) и (b) , что обеспечивает синхронизацию между параллельными ветвями.

Последовательное выполнение P и Q соответствует ситуации, когда один процесс начинает своё выполнение строго после окончания предыдущего. Пусть $P = A\langle a \rangle$, а $Q = (a).C$,

$$P|Q = A.\langle a \rangle.(a).C.$$

Далее параллельное исполнение обозначим знаком $+$, а последовательное знаком $*$.

Процесс может отправлять сообщения в несколько каналов, пусть для общности их будет n , и принимать сообщения из нескольких каналов, пусть их будет m , для обозначения будем использовать следующую нотацию:

1. $A.\langle a^1, a^2, \dots, a^n \rangle$ – отправка сообщений в каналы;
2. $(a^1, a^2, \dots, a^m).A$ – приём сообщений из каналов.

Далее под сетями Петри будем понимать РТ-ограниченные сети, для которых в каждом месте может быть произвольное количество фишек, но любые переход и место, если соединены, то единственным ребром, описание которых может быть найдено в [10].

Событиям, происходящим в системе, поставим в соответствие переходы в сети. Если между двумя событиями установлена причинно-следственная связь, то они соединены через единственное место в сети (маркированное пустым количеством фишек). Для каждого начального события считаем, что существует место с достаточным количеством фишек, в которое ведёт стрелка.

Рассмотрим несколько сценариев атак и построим для них соответствующие сети Петри.

Фишинговая атака на сотрудников. Пусть имеется атака на систему в следующей форме: «Злоумышленник инициирует атаку, создавая либо поддельную страницу аутентификации, либо внедряя вредоносный код для перехвата нажатий клавиш непосредственно на легитимном ресурсе. Следующим шагом становится массовая рассылка электронных писем, содержащих ссылки на этот скомпрометированный ресурс. После того как сотрудник переходит по ссылке и вводит свои учётные данные, нарушитель получает логин и пароль, которые затем проверяет на доступность для других корпоративных сервисов. Получив подтверждение, он выполняет вход в систему под учётной записью сотрудника. Дальнейшие действия зависят от текущей ситуации: это может быть эскалация привилегий, сбор сведений об администраторах сети либо попытка изменить пароли других пользователей».

Представим описание атаки в форме сети Петри, используя следующие обозначения:

1. t_1 – развёртывание поддельного веб-ресурса, имитирующего страницу аутентификации корпоративной системы (A – create_fake_site).
2. t_2 – интеграция в эту фальшивую страницу вредоносного скрипта, предназначенного для перехвата нажатий клавиш (B – inject_keylogger).

Оба этих действия являются инициирующими и выполняются до начала активной фазы атаки.

3. t_3 – массовая рассылка фишинговых писем, содержащих ссылки на поддельный сайт (C – send_phishing_email).
4. t_4 – перехват введённых жертвой логина и пароля после того, как она переходит по ссылке и заполняет форму (D – capture_credentials).
5. t_5 – проверка полученных учётных данных на возможность доступа к другим корпоративным сервисам (E – test_credentials).
6. t_6 – авторизация в системе под учётной записью сотрудника (F – login_as_employee).
7. t_7 – при необходимости – повышение привилегий в системе (G – escalate_privileges).
8. t_8 – сбор сведений о пользователях, обладающих административными правами (например, через Active Directory или базу учётных записей) (H – collect_admin_info).
9. t_9 – попытка смены паролей других сотрудников (J – reset_passwords).

Графическое представление соответствующей сети Петри показано на рис. 1.

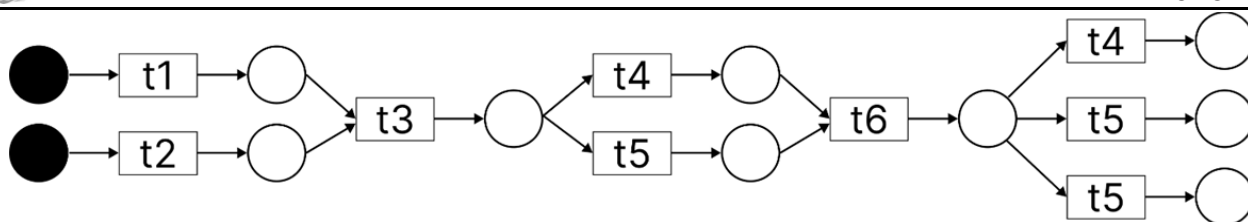


Рис. 1. Сети Петри фишинговой атаки на сотрудников

Зададим биективное отображение из множества переходов сети Петри $T\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9\}$ во множество процессов $M_n = \{A, B, C, D, E, F, G, H, J\}$, сопоставив их поэлементно – $t_1 - A$, $t_2 - B$, $t_3 - C$, $t_4 - D$, $t_5 - E$, $t_6 - F$, $t_7 - G$, $t_8 - H$, $t_9 - J$. Связь между процессами обозначим стрелкой, при этом, если два перехода были соединены в исходной сети Петри через место, то два процесса также будут соединены стрелкой и каналом с именем, соответствующим концу ориентированного ребра и верхним индексом – номером ребра среди всех входящих в вершину (см. рис. 2).

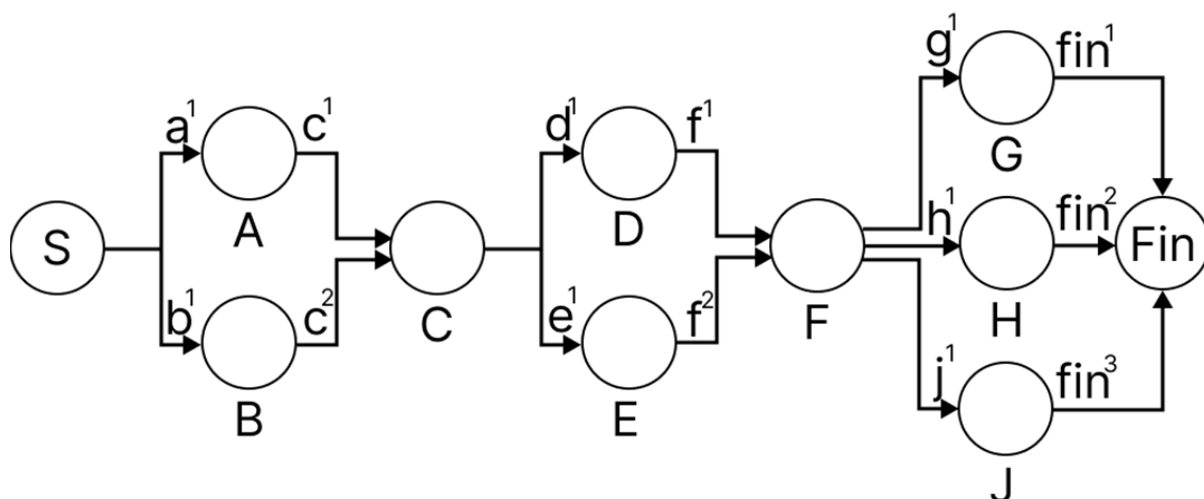


Рис. 2. Модель сети Петри фишинговой атаки на сотрудников

Для компактного описания построенной модели удобно использовать две эквивалентные записи. Первая – арифметическая, где операции «+» и «*» обозначают соответственно параллельное и последовательное выполнение процессов:

$$P = (A + B) * C * (D + E) * F * (G + H + J).$$

Вторая – развёрнутая, с явным указанием каналов обмена сообщениями в соответствии с введённой ранее нотацией:

$$P = S. \langle a^1, b^1 \rangle | ((a^1).A. \langle c^1 \rangle + (b^1).B. \langle c^2 \rangle) | (c^1, c^2).C. \langle d^1, e^1 \rangle | \\ | ((d^1).D. \langle f^1 \rangle + (e^1).E. \langle f^2 \rangle) | (f^1, f^2).F. \langle g^1, h^1, j^1 \rangle | \\ | ((g^1).G. \langle fin^1 \rangle + (h^1).H. \langle fin^2 \rangle + (j^1).J. \langle fin^3 \rangle) | (fin^1, fin^2, fin^3).Fin$$

Сценарий внедрения бэкдора с использованием вредоносного файла. Рассмотрим атаку, в которой злоумышленник осуществляет компрометацию системы через заражённый файл. Действия нарушителя развиваются по следующей схеме: «В основе данного сценария лежит создание заражённого файла, который доставляется цели либо по электронной почте, либо через ссылку на облачное хранилище – такой подход позволяет обойти возможные почтовые фильтры. После того как сотрудник открывает файл и запускается вредоносный код, возможны три варианта

развития событий. Если активируется прямое внедрение, на рабочую станцию устанавливается бэкдор, после чего нарушитель подключается к устройству удалённо и применяет специализированные утилиты для извлечения привилегированных учётных данных. В качестве альтернативы злоумышленник может использовать штатные средства Windows, создавая скрытые точки входа и организовав перехват паролей с помощью кейлоггера. Третий путь связан с изменением системных параметров безопасности – отключением антивируса и настройкой автозапуска вредоносного кода при перезагрузке. Это открывает возможность для сканирования локальной сети, перемещения внутри инфраструктуры и дальнейшей компрометации других хостов с использованием уязвимостей SMB или RDP».

В терминах переходов сети Петри введём следующие обозначения:

1. t_1 – формирование исполняемого файла с вредоносной нагрузкой (A – create_malicious_file).
2. t_2 – отправка полученного файла адресату по каналам электронной почты или через мессенджеры (B – deliver_file_to_target).
3. t_3 – загрузка вредоносного объекта в облачное хранилище и передача жертве ссылки на него (C – upload_file_to_cloud_and_send_link).
4. t_4 – открытие файла пользователем и активация встроенного скрипта или макроса (D – employee_opens_file_and_executes_code).
5. t_5 – применение штатных утилит ОС Windows для скрытного выполнения вредоносных операций (E – use_living_off_the_land_tools).
6. t_6 – внесение изменений в параметры безопасности системы с целью отключения антивирусной защиты (F – modify_security_settings).
7. t_7 – развёртывание бэкдора на рабочей станции жертвы (G – install_backdoor_on_workstation).
8. t_8 – организация резервных скрытых точек подключения для сохранения доступа (H – create_hidden_access_points).
9. t_9 – настройка автоматического запуска вредоносного компонента при каждой перезагрузке системы (I – setup_malware_autorun).
10. t_{10} – инициирование удалённой сессии злоумышленника к скомпрометированному устройству (J – connect_remotely_to_compromised_device).
11. t_{11} – перехват нажатий клавиш с использованием кейлоггера для получения паролей (K – intercept_passwords_with_keylogger).
12. t_{12} – сканирование локальной сети для обнаружения уязвимых узлов (L – scan_internal_network_for_vulnerabilities).
13. t_{13} – латеральное перемещение по сети и компрометация дополнительных хостов (N – lateral_movement_to_other_systems).
14. t_{14} – применение специализированных утилит для извлечения учётных записей с повышенными привилегиями (M – privilege_escalation).
15. t_{15} – эксплуатация известных уязвимостей протоколов SMB или RDP для дальнейшего распространения атаки внутри инфраструктуры (O – exploit_smb_or_rdp_to_spread).

Схема соответствующей сети Петри показана на рис. 3.

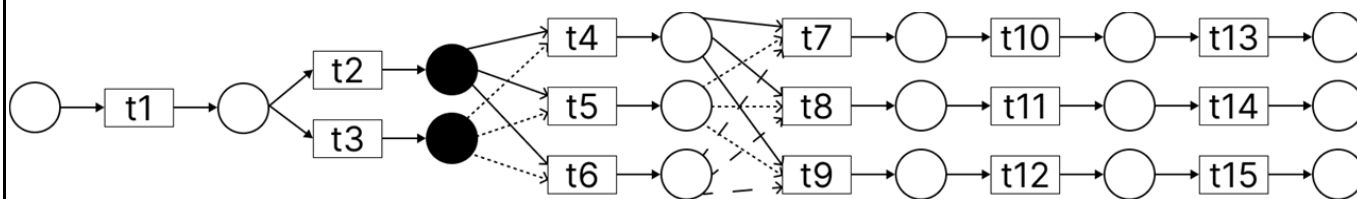


Рис. 3. Сети Петри атаки через внедрение бэкдора с использованием вредоносного файла

Далее построим графическое представление аналогично предыдущей атаке (см. рис. 4).

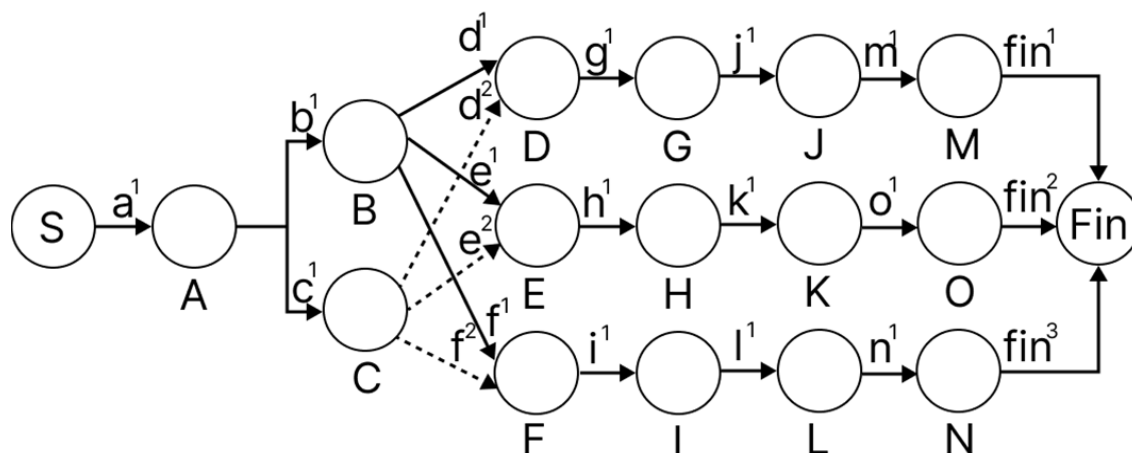


Рис. 4. Модель сети Петри атаки через внедрение бэкдора с использованием вредоносного файла

Данную атаку можно представить в арифметической форме:

$$P = A * (B + C) * (D * G * J * M + E * H * K * O + F * I * L * N)$$

или с использованием введённой ранее нотации:

$$P = S\langle a^1 \rangle | (a^1).A.\langle b^1, c^1 \rangle | ((b^1).B.\langle d^1, e^1, f^1 \rangle + (c^1).C.\langle d^2, e^2, f^2 \rangle) | \\ \left[\begin{array}{l} (d^1, d^2).D.\langle g^1 \rangle | (g^1).G.\langle j^1 \rangle | (j^1).J.\langle m^1 \rangle | (m^1).M.\langle fin^1 \rangle \\ + (e^1, e^2).E.\langle h^1 \rangle | (h^1).H.\langle k^1 \rangle | (k^1).K.\langle o^1 \rangle | (o^1).O.\langle fin^2 \rangle \\ + (f^1, f^2).F.\langle i^1 \rangle | (i^1).I.\langle l^1 \rangle | (l^1).L.\langle n^1 \rangle | (n^1).N.\langle fin^3 \rangle \end{array} \right] \\ (fin^1, fin^2, fin^3).Fin$$

Атака на веб-приложение через внедрение SQL-кода. Рассмотрим ещё один распространённый сценарий, связанный с эксплуатацией уязвимостей веб-систем. Действия злоумышленника развиваются в следующей последовательности: «Данный сценарий начинается с анализа веб-сайта на наличие уязвимостей, при этом для поиска инъекционных точек применяются автоматизированные инструменты. После обнаружения SQL-инъекции дальнейшие действия нарушителя могут развиваться по трём направлениям. В первом случае найденная уязвимость эксплуатируется для получения прямого доступа к базе данных, откуда извлекаются логины и хеши паролей пользователей, после чего злоумышленник авторизуется под учётной записью администратора и повышает свои привилегии для доступа к конфиденциальной информации. Второй вариант предполагает подбор специальных payload для обхода фильтров веб-приложения, выгрузку структуры таблиц, декодирование парольных хешей, а также изменение прав существующих администраторов и последующее манипулирование содержимым базы данных. Третий путь связан с обходом систем веб-экранирования, внедрением бэкдора непосредственно в базу данных, созданием новых административных учётных записей, инъекцией вредоносного кода и распространением атаки на другие сервисы компании, включая CRM, ERP и внутреннюю сеть».

В терминах переходов сети Петри введём следующие обозначения:

1. t_1 – анализ веб-ресурса на предмет уязвимостей (A – scan_website).
2. t_2 – применение автоматических инструментов для локализации инъекционных точек (B – use_automated_tools).
3. t_3 – обнаружение факта наличия SQL-инъекции (C – detect_sql_injection).
4. t_4 – генерация эксплойтов с целью обхода входных фильтров веб-приложения (D – craft_payloads).

5. t_5 – применение приёмов обхода систем защиты на уровне веб-экрана (E – waf_bypass).
 6. t_6 – реализация инъекции для получения несанкционированного доступа к хранилищу данных (F – inject_and_access_db).
 7. t_7 – извлечение метаинформации о структуре базы данных (G – dump_db_structures).
 8. t_8 – создание скрытой точки опоры в базе данных (H – db_backdoor).
 9. t_9 – копирование учётных записей (J – extract_user_credentials).
 10. t_{10} – восстановление паролей из хешей (K – crack_password_hashes).
 11. t_{11} – формирование дополнительных административных учётных записей (L – create_admin_accounts).
 12. t_{12} – вход в систему под профилем администратора (M – login_as_admin).
 13. t_{13} – переопределение прав доступа существующих администраторов (O – changing privileges).
 14. t_{14} – внедрение исполняемого скрипта на серверную часть (Web Shell, Reverse Shell) (N – inject_malicious_code).
 15. t_{15} – расширение полномочий и получение доступа к секретным сведениям (P – privilege_escalation).
 16. t_{16} – проведение модификаций данных (Q – manipulate_db).
 17. t_{17} – перенос атаки на иные сервисы организации (R – spread_to_internal_services).
- Схема соответствующей сети Петри показана на рис. 5.

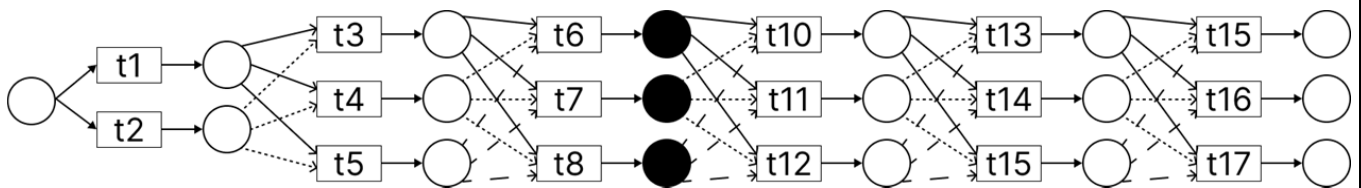


Рис. 5. Сети Петри атаки на веб-приложение через внедрение SQL-кода

Далее построим графическое представление аналогично предыдущей атаке (см. рис. 6). Данную атаку можно представить в арифметической форме:

$$P = (A + B) * (C * F * J * M * P + D * G * K * O * Q + E * H * L * N * R)$$

или с использованием введённой ранее нотации:

$$P = S\langle a^1, b^1 \rangle. ((a^1).A.\langle c^1, d^1, e^1 \rangle + (b^1).B.\langle c^2, d^2, e^2 \rangle). \\ \left[\begin{aligned} &(c^1, c^2).C.\langle f^1 \rangle|(f^1).F.\langle j^1 \rangle|(j^1).J.\langle m^1 \rangle|(m^1).M.\langle p^1 \rangle|(p^1).P.\langle fin^1 \rangle \\ &+(d^1, d^2).D.\langle g^1 \rangle|(g^1).G.\langle k^1 \rangle|(k^1).K.\langle o^1 \rangle|(o^1).O.\langle q^1 \rangle|(q^1).Q.\langle fin^2 \rangle \\ &+(e^1, e^2).E.\langle h^1 \rangle|(h^1).H.\langle l^1 \rangle|(l^1).L.\langle n^1 \rangle|(n^1).N.\langle r^1 \rangle|(r^1).R.\langle fin^3 \rangle \end{aligned} \right] \\ Fin(fin^1, fin^2, fin^3).$$

Заключение. Подобная нотация позволяет отследить причинно-следственные связи между отдельными действиями злоумышленника на протяжении всего сценария атаки [16]. В отличие от традиционных графов атак или деревьев решений предлагаемый подход, основанный на сетях Петри и расширенной процессной алгебре с каналами, обеспечивает строгое формальное описание как последовательных, так и параллельных ветвей поведения нарушителя, учитывает необходимость пересылки информации между отдельными этапами [6]. Введение стартового процесса S и терминального Fin позволяет замкнуть модель, явно выделив этапы подготовки и завершения, что особенно важно для корректного анализа полного жизненного цикла вторжения.

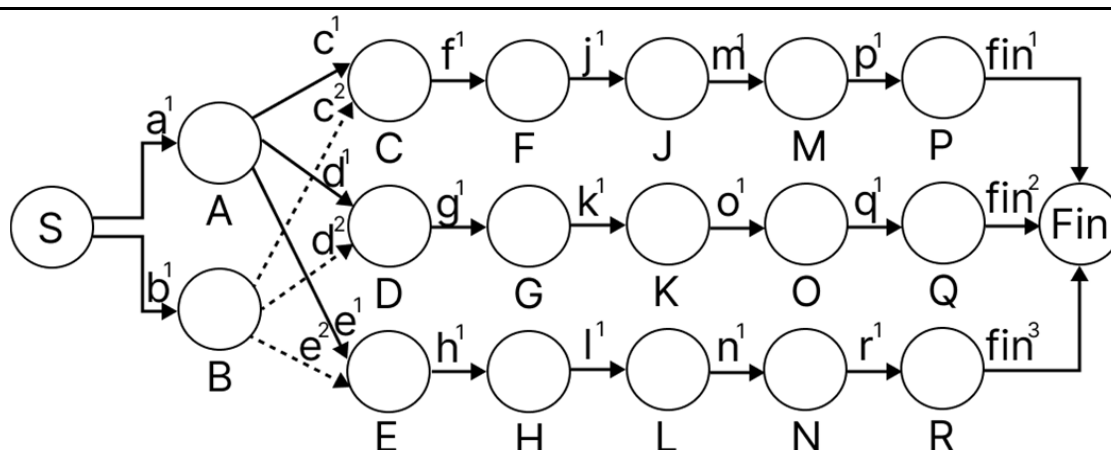


Рис. 6. Модель сети Петри атаки на веб-приложение через внедрение SQL-кода

К числу преимуществ используемого подхода стоит отнести использование РТ-ограниченных сетей Петри, что, во-первых, позволяет наглядно визуализировать структуру атаки, а взаимно-однозначное соответствие между переходами и процессами упрощает переход от графического представления к аналитической записи. Во-вторых, однонаправленные каналы с явным разделением операций отправки и приёма сообщений позволяют точно фиксировать моменты синхронизации и обмена данными между ветвями, что критично для сценариев с условными переходами и параллельными действиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов, А. С. Использование сетей Петри при обеспечении информационной безопасности / А. С. Баранов // Наукосфера. – 2022. – № 9-1. – С. 144-147.
2. Бородин, А. В. Использование сетей Петри для моделирования компьютерных атак / А. В. Бородин, С. В. Петров // Информационная безопасность регионов. – 2023. – № 2 (41). – С. 14-21.
3. Гайдамакин, Н. А. Событийная модель процесса идентификации воздействий на файлы при расследовании инцидентов информационной безопасности, основанная на математическом аппарате сетей Петри / Н. А. Гайдамакин, Р. В. Гибилинда, Н. И. Синадский // Вестник СибГУТИ. – 2020. – № 1. – С. 73-88.
4. Гордеев, А. В. Моделирование атак на информационную систему с использованием матрицы связей уязвимостей / А. В. Гордеев, Н. В. Жукова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Информатика и вычислительная техника. – 2018. – № 2. – С. 107-116.
5. Грачев, М. В. Моделирование кибератак на информационные системы на основе теории графов / М. В. Грачев, А. В. Переверзев // Системы и средства информатики. – 2019. – Т. 29. – Вып. 2. – С. 43-59.
6. Долгов, А. С. Моделирование угроз кибербезопасности информационных систем на основе теории системных динамических переходов / А. С. Долгов, Н. А. Соколова, С. А. Кабанов // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – № 5. – С. 54-59.
7. Дударев, А. В. Использование теории систем переходов при моделировании кибератак / А. В. Дударев, А. В. Герус // Проблемы безопасности информационных технологий. – 2019. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 43-49.
8. Моделирование атакующих воздействий и средств защиты корпоративной сети с помощью сетей Петри / А. В. Зайцев, Д. С. Ложкин, Е. А. Федорова, П. А. Смирнов // Информационные технологии. – 2021. – № 5. – С. 32-39.
9. Козлов, А. А. Моделирование угроз безопасности информации на основе систем переходов состояний / А. А. Козлов, Ю. Ю. Ходяков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19. – Вып. 4. – С. 682-687.
10. Котов, В. Е. Сети Петри / В. Е. Котов. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
11. Носков, С. И. Уточнение алгоритма построения линейной регрессии на основе применения метода смешанного оценивания параметров / С. И. Носков, С. В. Беляев, Н. В. Антипина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2026. – № III (91). – С. 57-63.

12. Трещев, И. А. О подходе к анализу векторов атак злоумышленников на информационные системы с использованием событийно-формальной модели / И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев // Инженерный вестник Дона. – 2026. – № 1 (133). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2026/10641 (дата обращения: 12.09.2026). – Текст: электронный.
13. Трещев, И. А. Событийная формальная модель поведения злоумышленника / И. А. Трещев, Е. И. Монастырная // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 42-46.
14. Формальная модель полного множества реализаций угроз информационной безопасности автоматизированных систем / В. А. Хвостов, М. А. Багаев, А. А. Кисляк, А. В. Даурцев, Д. В. Солод // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 11-12 (77-78). – С. 82-87.
15. Шелупанов, А. А. Моделирование информационных систем и угроз безопасности с использованием сетей Петри / А. А. Шелупанов, В. В. Косенко, С. А. Чеботарев. – Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2014. – 210 с.
16. McDermott, J. Attack Net Penetration Testing / J. McDermott // Proceedings of the 2000 New Security Paradigms Workshop. – 2000. – P. 15-24. – DOI: 10.1145/366173.366186.

REFERENCES

1. Baranov A.S. Ispolzovanie setey Petri dlya obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti [Use of Petri nets for ensuring information security]. Naukosfera, 2022, no. 9-1, pp. 144-147. (In Russian)
2. Borodin A.V., Petrov S.V. Ispolzovanie setey Petri dlya modelirovaniya kompyuternykh atak [Use of Petri nets for modeling computer attacks]. Informatsionnaya bezopasnost regionov [Information Security of Regions], 2023, no. 2(41), pp. 14-21. (In Russian)
3. Gaidamakin N.A., Gibilinda R.V., Sinadsky N.I. Sobytiynaya model protsessa vyyavleniya vozdeystviy na fayly pri rassledovanii intsidentov informatsionnoy bezopasnosti na osnove matematicheskogo apparata setey Petri [Event model of the process of identifying impacts on files during information security incident investigation based on the mathematical apparatus of Petri nets]. Vestnik SibGUTI [Bulletin of SibSUTI], 2020, no. 1, pp. 73-88. (In Russian)
4. Gordeev A.V., Zhukova N.V. Modelirovanie atak na informatsionnyuyu sistemu s ispolzovaniem matritsy korrelyatsii uyazvimostey [Modeling attacks on an information system using a vulnerability correlation matrix]. Vestnik PNIPU. Informatika i vychislitelnaya tekhnika [Bulletin of PNRPU. Computer Science and Computer Engineering], 2018, no. 2, pp. 107-116. (In Russian)
5. Grachev M.V., Pereverzev A.V. Modelirovanie kiberatak na informatsionnye sistemy na osnove teorii grafov [Modeling cyberattacks on information systems based on graph theory]. Sistemy i sredstva informatiki [Systems and Means of Informatics], 2019, vol. 29, iss. 2, pp. 43-59. (In Russian)
6. Dolgov A.S., Sokolova N.A., Kabanov S.A. Modelirovanie ugroz kiberbezopasnosti informatsionnykh sistem na osnove teorii sistemnykh dinamicheskikh perekhodov [Modeling cybersecurity threats of information systems based on the theory of system dynamic transitions]. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii [Control Systems and Information Technology], 2018, no. 5, pp. 54-59. (In Russian)
7. Dudarev A.V., Gerus A.V. Ispolzovanie teorii sistem perekhodov dlya modelirovaniya kiberatak [Using transition system theory for modeling cyberattacks]. Problemy informatsionnoy bezopasnosti [Problems of Information Technologies Security], 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 43-49. (In Russian)
8. Zaitsev A.V., Lozhkin D.S., Fedorova E.A., Smirnov P.A. Modelirovanie atakuyushchikh vozdeystviy i sredstv zashchity korporativnoy seti s ispolzovaniem setey Petri [Modeling attacking impacts and corporate network protection means using Petri nets]. Informatsionnye tekhnologii [Information Technologies], 2021, no. 5, pp. 32-39. (In Russian)
9. Kozlov A.A., Khodyakov Yu.Yu. Modelirovanie ugroz informatsionnoy bezopasnosti na osnove sistem perekhodov sostoyaniy [Modeling information security threats based on state transition systems]. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2019, vol. 19, iss. 4, pp. 682-687. (In Russian)
10. Kotov V.E. Seti Petri [Petri Nets]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 160 p. (In Russian)
11. Noskov S.I., Belyaev S.V., Antipina N.V. Utochnenie algoritma postroeniya lineynoy regressii na osnove primeneniya smeshannogo metoda otsenki parametrov [Refinement of the linear regression construction algorithm based on the application of the mixed parameter estimation method]. Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure



gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike [Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Engineering Sciences], 2026, no. III(91), pp. 57-63. (In Russian)

12. Treshchev I.A., Grigoriev Ya.Yu. Ob odnom podkhode k analizu vektorov atakuyushchego na informatsionnye sistemy s ispolzovaniem sobytiyno-formalnoy modeli [On an approach to analyzing attacker vectors on information systems using an event-formal model]. Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don], 2026, no. 1(133). Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2026/10641 (accessed 12 September 2026). (In Russian)

13. Treshchev I.A., Monastyrnaya E.I. Sobytiyno-formalnaya model povedeniya narushitelya [Event-based formal model of attacker behavior]. Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University], 2024, no. I(73), pp. 42-46. (In Russian)

14. Khvostov V.A., Bagaev M.A., Kislyak A.A., Daurtsev A.V., Solod D.V. Formalnaya model polnogo mnozhestva realizatsiy ugroz informatsionnoy bezopasnosti dlya avtomatizirovannykh sistem [Formal model of the complete set of information security threat implementations for automated systems]. Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu [Defense Technology Issues. Series 16. Technical Means of Counteracting Terrorism], 2014, no. 11-12(77-78), pp. 82-87. (In Russian)

15. Shelupanov A.A., Kosenko V.V., Chebotarev S.A. Modelirovanie informatsionnykh sistem i ugroz bezopasnosti s ispolzovaniem setey Petri [Modeling information systems and security threats using Petri nets]. Tomsk, Tomsk State University Publishing House, 2014. 210 p. (In Russian)

16. McDermott J. Attack Net Penetration Testing. Proceedings of the 2000 New Security Paradigms Workshop, 2000, pp. 15-24. DOI: 10.1145/366173.366186.

Хряпенко К. Д., Григорьева А. Л., Болотский А. С.
K. D. Khryapenko, A. L. Grigorieva, A. S. Bolotsky

ИНТЕГРАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЖЁСТКОПЛАСТИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ С РАЗРЫВНЫМИ ПОЛЯМИ СКОРОСТЕЙ

INTEGRATION OF PHYSICALLY INFORMED NEURAL NETWORKS INTO A RIGID-PLASTIC CRACKING MODEL WITH DISCONTINUOUS VELOCITY FIELDS

Хряпенко Ксения Дмитриевна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vicarious024@mail.ru.

Ksenia D. Khryapenko – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vicarious024@mail.ru.

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая 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.

Болотский Александр Сергеевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Alexander S. Bolotsky – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Рассмотрена задача моделирования мгновенного трещинообразования жёсткопластических пластин. Предложен гибридный подход к моделированию мгновенного трещинообразования жёсткопластических пластин, объединяющий теорию разрывных полей скоростей Оната-Прагера и ФИНС. Сформулирована математическая модель мгновенного разрушения на основе энергетического критерия $W = W^*$ и кинематического соотношения для скорости вершины трещины c , связанной со скоростью растяжения V и углом γ . Разработана архитектура ФИНС с составной функцией потерь, кодирующих уравнения равновесия, граничные условия, энергетический критерий, кинематику трещины, вариационный принцип и экспериментальные данные. Численная верификация подтверждает непротиворечивость модели и согласуется с вариационным принципом единственности решения.

Summary. The problem of modeling instantaneous cracking of rigid-plastic plates is considered. A hybrid approach to modeling instantaneous cracking of rigid-plastic plates is proposed, combining the Onata-Prager theory of discontinuous velocity fields and the PINN. A mathematical model of instantaneous fracture is formulated based on the energy criterion $W = W^*$ and a kinematic relationship for the crack tip velocity c , related to the tensile velocity V and the angle γ . A PINN architecture with a composite loss function encoding the equilibrium equations, boundary conditions, energy criterion, crack kinematics, the variational principle, and experimental data is developed. Numerical verification confirms the model's consistency and is consistent with the variational principle of uniqueness of the solution.

Ключевые слова: жёсткопластическая модель, мгновенное разрушение, энергетический критерий, физически информированные нейронные сети, разрывные поля скоростей.

Key words: rigid-plastic model, instantaneous failure, energy criterion, physically informed neural networks, discontinuous velocity fields.

УДК 51-7

Введение. Проблема моделирования локализованного разрушения деформируемых твёрдых тел остаётся одной из фундаментальных задач современной механики сплошных сред. Процессы шейкообразования, зарождения и развития трещин в жёсткопластических пластинах и по-

лосах при растяжении сопровождаются интенсивной локализацией деформаций вдоль линий скольжения, что требует применения специальных математических моделей, способных корректно описывать разрывные поля скоростей перемещений. Классические подходы, основанные на теории идеальной пластичности и решениях Оната-Прагера, позволяют получить аналитические выражения для кинематики пластического течения и энергетического баланса на линиях разрыва. Однако практическое применение этих моделей ограничено сложностью учёта эволюции геометрии трещины и движущихся границ пластической зоны [1].

Традиционные численные методы, в первую очередь метод конечных элементов (МКЭ), сталкиваются с серьёзными трудностями при моделировании задач с разрывными полями скоростей и движущимися границами разрушения [12]. Необходимость постоянного сгущения сетки в окрестности вершины трещины (перестроение полигональной сетки), проблемы сходимости итерационных процессов при сильной нелинейности и локализации деформаций, а также вычислительная затратность трёхмерных расчётов существенно ограничивают применимость МКЭ для задач мгновенного разрушения [2; 3; 4].

В последние годы значительный прогресс достигнут в применении методов машинного обучения, в частности физически информированных нейронных сетей (ФИНС), для решения уравнений в частных производных [16]. Архитектура ФИНС позволяет встраивать физические законы непосредственно в функцию потерь нейронной сети, обеспечивая выполнение уравнений равновесия, граничных условий и критериев пластичности без необходимости построения расчётной сетки. Вариационные формулировки ФИНС демонстрируют высокую эффективность при работе с энергетическими критериями и слабыми постановками задач. Тем не менее применение ФИНС для задач с разрывными полями скоростей и движущимися границами разрушения в жёсткопластических телах остаётся недостаточно исследованным направлением, что определяет актуальность работы.

Целями исследований явились разработка и обоснование гибридного подхода к моделированию мгновенного трещинообразования жёсткопластических пластин при растяжении, объединяющего вариационный энергетический критерий зарождения и роста трещины с аппаратом физически информированных нейронных сетей. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: формулировка математической модели мгновенного разрушения на основе жёсткопластического подхода с разрывными полями скоростей; разработка архитектуры ФИНС, учитывающей специфику задачи (разрывы, движущиеся границы, вариационный принцип); численная верификация предложенного подхода на примере моделирования трёх характерных состояний пластины (без нагрузки, начальное состояние, предразрушение); анализ кинетики разрушения и подтверждение физической непротиворечивости модели.

Математическая модель мгновенного трещинообразования. Рассмотрим математическое описание процесса трещинообразования при растяжении жёсткопластической пластины (полосы) в рамках модели с разрывным полем скоростей.

В предлагаемой модели «мгновенность» разрушения трактуется как отсутствие упругой стадии деформирования: пластическое течение локализуется вдоль линий скольжения сразу после достижения предела текучести, а зарождение и рост трещины определяются энергетическим балансом на этих линиях разрыва [7; 9]. Кинематически допустимое поле скоростей описывается классическим решением Оната-Прагера [19], в котором пластическая зона разбивается на треугольники постоянного напряжения состояния, разделённые линиями разрыва скоростей, ориентированные под углом $\alpha = \frac{\pi}{4}$ к оси растяжения [11]. Отсутствие упругой податливости означает, что переход от однородного течения к локализованному разрыву происходит мгновенно при достижении условия пластичности во всём сечении [5; 6; 8].

Разрушение не связывается с глобальными деформациями образца, а определяется локальным накоплением пластической работы в узких зонах сдвига. Критерий зарождения трещины формулируется в виде условия достижения критической плотности диссипации на линии разрыва скоростей:

$$W = W^* \text{ или эквивалентно } \varepsilon_i = \varepsilon_i^*, \quad (1)$$

где W – объёмная плотность мощности диссипации энергии в частице материала при пересечении линии разрыва скоростей; W^* – критическая константа разрушения (материальная характеристика); ε_i – главная деформация; ε_i^* – предельная деформация.

Поскольку W и ε_i взаимно однозначно связаны в пластическом состоянии, энергетический и деформационный критерии равносильны. Константы W^* и ε_i^* определяются через стандартные характеристики пластичности из испытаний на растяжение:

$$W^* = f(\delta, \psi),$$

где δ – относительное удлинение; ψ – относительное сужение площади поперечного сечения.

Это обеспечивает верифицируемость модели и переход от абстрактных констант к измеряемым на практике величинам.

При выполнении условия (1) вершина трещины начинает перемещаться со скоростью c в направлении вектора, образующего угол γ с осью распространения трещины, и определяется соотношением

$$c = \frac{V}{\sqrt{2} \sin \gamma \left(\frac{W^*}{k} - 1 \right)}, \quad (2)$$

где V – скорость растяжения концов полосы; k – предел текучести материала при чистом сдвиге; γ – угол между вектором роста трещины и линией скольжения.

Минимальная скорость трещины («устойчивый» рост) достигается при $\gamma \rightarrow \frac{\pi}{2}$, что соответствует максимальной работе, затраченной на деформацию до полного разрушения.

Задача о растяжении жёсткопластической полосы с разрывным полем скоростей имеет бесконечное множество математических решений (различные положения точки пересечения линий скольжения, разные углы γ) [10]. Физическая определённости вводится через вариационный энергетический критерий:

$$\delta W_{\text{дис}} = 0, \quad W_{\text{дис}} \rightarrow \max_{\text{по полю}}, \quad W_{\text{дис}} \rightarrow \min_{\text{по смещениям линий}}, \quad (3)$$

т. е. из всех возможных пластических течений реализуется то, при котором плотность диссипации максимальна в пластической зоне на линии разрыва, но минимальна по всем возможным смещениям этих линий.

Данный принцип автоматически фиксирует направление роста трещины и исключает неустойчивые ветвления.

Математическая схема процесса включает шесть последовательных этапов:

1. Нагружение → достижение предела текучести во всём сечении.
2. Локализация → формирование линий разрыва скоростей (решение Оната-Прагера).
3. Накопление диссипаций → рост W вдоль линий скольжения.
4. Критический момент → $W = W^*$.
5. Рост трещины → $c > 0$.
6. Разрушение → полная потеря несущей способности.

Предложенная модель обеспечивает физически непротиворечивое описание мгновенного трещинообразования и служит основой для построения аппроксимирующей модели на базе ФИНС.

Интеграция физически информированных нейронных сетей. Необходима модификация стандартной архитектуры и функции потерь. Для аппроксимации решения используется система из трёх связанных подсетей, каждая из которых отвечает за свой физический контур задачи, а именно: поле скоростей $v(x, t)$; плотность диссипации $W(x, t)$; положение вершины трещины $l(t)$. Совместное обучение трёх подсетей обеспечивает согласованное описание кинематики пластического течения и эволюции трещины. Выходы сетей v и l дифференцируемы по входам, что позволяет вычислять невязки уравнений через автоматическое дифференцирование без конечно-разностных аппроксимаций [13; 14; 20].

Функция потерь конструируется как взвешенная сумма слагаемых, каждое из которых кодирует отдельный физический закон:

$$\mathcal{L} = \lambda_1 \mathcal{L}_{\text{равн.и пластичн.}} + \lambda_2 \mathcal{L}_{\text{гр.услов.}} + \lambda_3 \mathcal{L}_{\text{откл.от эн.кр.}} + \lambda_4 \mathcal{L}_{\text{вып.кин.соотн.}} + \lambda_5 \mathcal{L}_{\text{вар.принц.}} + \lambda_6 \mathcal{L}_{\text{вх.данны.}}$$

где λ_i – весовые коэффициенты, подбираемые методами балансировки весов на основе нейронно-касательного ядра (NTK-based weighting) или нормализации градиента (GradNorm) для устранения конфликта градиентов; $\mathcal{L}$ – функция потерь; $\mathcal{L}_{\text{равн.и пластичн.}}$ обеспечивает выполнение уравнений равновесия и условия пластичности; $\mathcal{L}_{\text{гр.услов.}}$ учитывает граничные условия на торцах пластины; $\mathcal{L}_{\text{откл.от эн.кр.}}$ – отклонение от энергетического критерия зарождения трещины (1) на фронте разрушения; $\mathcal{L}_{\text{вып.кин.соотн.}}$ контролирует выполнение кинематического соотношения (2) для скорости вершины трещины; $\mathcal{L}_{\text{вар.принц.}}$ – реализует вариационный принцип (3) в виде штрафа за отклонение от седловой точки функционала диссипации; $\mathcal{L}_{\text{вх.данны.}}$ – обеспечивает согласование с экспериментальными данными испытаний на растяжение и используется для идентификации констант разрушения.

$$\mathcal{L}_{\text{равн.и пластичн.}} = \frac{1}{N_\Omega} \sum_{i=1}^{N_\Omega} \|\nabla \cdot \sigma(v_i)\|^2 + \|f(\sigma_i) - k\|^2,$$

где суммирование ведётся по N_Ω точкам коллокации в пластической зоне.

$$\mathcal{L}_{\text{гр.услов.}} = \frac{1}{N_{\text{гранич}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{гранич}}} \left[(v_{x,i}^{\text{пред.}} - v_{x,i}^{\text{цел.}})^2 + (v_{y,i}^{\text{пред.}} - v_{y,i}^{\text{цел.}})^2 \right],$$

где $N_{\text{гранич}}$ – количество точек коллокации на границе $\partial\Omega$; $v_{\text{пред.}} = (v_x^{\text{пред.}}; v_y^{\text{пред.}})$ – предсказанное нейронной сетью поле скоростей; $v_{\text{цел.}} = (v_x^{\text{цел.}}; v_y^{\text{цел.}})$ – целевое (заданное) поле скоростей на границе.

$$\mathcal{L}_{\text{откл.от эн.кр.}} = \frac{1}{N_\Gamma} \sum_{j=1}^{N_\Gamma} (W(x_j, t) - W^*)^2,$$

где N_Γ – число точек на линии разрыва скоростей.

$$\mathcal{L}_{\text{вып.кин.соотн.}} = \frac{1}{N_t} \sum_{n=1}^{N_t} \left(\left. \frac{dl}{dt} \right|_{t_n} - \frac{V}{\sqrt{2} \sin \gamma \left(\frac{W^*}{k} - 1 \right)} \right)^2,$$

где N_t – число дискретных моментов времени t_n , в которых вычисляется невязка обыкновенных дифференциальных уравнений.

$$\mathcal{L}_{\text{вар.принц.}} = \left\| \frac{\delta W_{\text{дис}}}{\delta u_{\text{смещ}}} \right\|^2,$$

где $u_{\text{смещ}}$ – смещение линий скольжения.

$$\mathcal{L}_{\text{вх.данны.}} = \frac{1}{N_{\text{эксп}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{эксп}}} \left(W_{\text{пред}}^{(m)} - W_{\text{эксп}}^{(m)}(\delta, \psi) \right)^2,$$

где $N_{\text{эксп}}$ – число экспериментальных точек; $W_{\text{эксп}}$ – критическая плотность диссипации, вычисленная через стандартные характеристики пластичности δ и ψ .

Для описания эволюции движущейся вершины трещины вводится функция уровня $\phi(x, t) = 0$, задающая фронт разрушения. Эволюция ϕ подчиняется уравнению Гамильтона-Якоби, согласованному с кинематическим соотношением (2). Обучение ФИНС производится с использованием маски Хевисайда $H(\phi)$, что позволяет отделять сплошную часть пластины от зоны

разрушения. Дополнительно применяется адаптивное сгущение точек коллокации (adaptive sampling) в окрестности ожидаемых линий разрыва: на каждой итерации обучения плотность точек увеличивается в областях с максимальной невязкой $\mathcal{L}_W$, что обеспечивает разрушение тонкой структуры пластической зоны без избыточного измельчения сетки во всей области [15; 17; 18].

Численная верификация модели и анализ результатов. Для проверки физической непротиворечивости предложенной модели и вариационного принципа проведена серия вычислительных экспериментов, воспроизводящих процесс мгновенного растяжения жёсткопластической пластины от начала нагружения до полного разрушения.

Рассматривается плоская пластина прямоугольной формы размером 10×5 см (см. рис. 1-3), растягиваемая вдоль оси X со скоростью V . Материал пластины подчиняется жёсткопластической модели с разрывным полем скоростей; линии скольжения ориентированы под углом $\alpha = \frac{\pi}{4}$ к оси нагружения (решение Оната-Прагера). В качестве прокси-модели плотности диссипации W используется аналитическая аппроксимация, учитывающая базовое растяжение, концентрацию деформаций в центральной части (шейка) и компенсационное сужение по оси Y для сохранения объёма. Критическое значение W^* нормируется к единице, что позволяет отслеживать относительную диссипацию W/W^* на всех стадиях процесса. Расчётная сетка содержит 300×150 узлов, что обеспечивает достаточное разрешение для визуализации тонкой структуры пластической зоны. Все результаты представлены в безразмерных переменных, что делает их универсальными для материалов с различными значениями W^* и k .

На рис. 1-3 представлены три характерных состояния пластины, отражающих ключевые этапы эволюции разрушения (см. табл. 1).



Рис. 1. Состояние пластины без нагрузки (напряжение и деформация отсутствуют)

Таким образом, эволюция поля диссипации наглядно демонстрирует переход от однородного течения к локализованному разрыву и последующему замедлению трещины на стадии предразрушения.

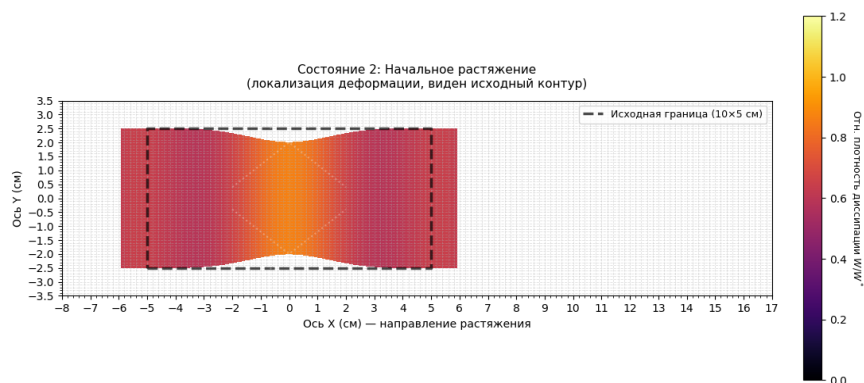


Рис. 2. Состояние пластины с начальным растяжением (локализация деформации)

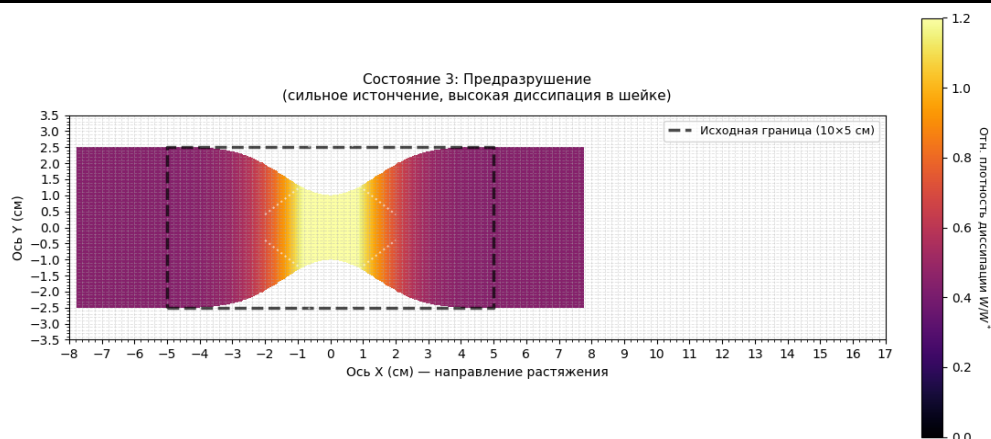


Рис. 3. Состояние пластины: предразрушение (сильное истончение, высокая диссипация в шейке)

Таблица 1

Эволюция напряжённо-деформированного состояния

Состояния	Описание состояний
Состояние 1 (см. рис. 1) – ненагруженная пластина	Поле деформаций однородно, линии скольжения не активированы, плотность диссипации $\frac{W}{W^*} = 0$. Это состояние служит исходной точкой отсчёта для анализа
Состояние 2 (см. рис. 2) – начальное растяжение ($\epsilon = 0,18$; $\frac{W}{W^*} = 0,35$)	Наблюдается локализация деформации в центральной части пластины с формированием шейки. Вдоль линий скольжения Оната-Прагера начинается скачкообразный рост деформаций. Угол раскрытия трещины γ максимален ($52,7^\circ$), поскольку отношение c/V велико при $W \ll W^*$, согласно формуле (2). Это стадия устойчивого роста трещины
Состояние 3 (см. рис. 3) – предразрушение ($\epsilon = 0,55$; $\frac{W}{W^*} = 0,92$)	Пластина находится в стадии мгновенного разрушения. Несмотря на максимальную деформацию, угол γ резко уменьшается ($3,5^\circ$), т. к. множитель $\left(\frac{W^*}{k-1}\right)^{-1}$ в формуле (2) стремится к нулю и скорость c падает. Разрушение завершается по уже сформированному пути с минимальным сопротивлением

Закключение. Разработанная модель и её численная реализация подтвердили физическую непротиворечивость предложенного гибридного подхода, сочетающего классическую теорию разрывных полей скоростей и аппарат ФИНС. В результате работы получены следующие результаты: сформулирована математическая модель мгновенного разрушения; разработана специализированная архитектура ФИНС с составной функцией потерь; проведена численная верификация на модели пластины, которая показала согласование с вариационным принципом минимакса плотности диссипации.

Предложен функционал потерь для ФИНС, явно учитывающий вариационный принцип Оната-Прагера и обеспечивающий выбор физически реализуемой траектории трещины без введения эмпирических регуляризаторов.

Перспективным направлением дальнейшего исследования является экспериментальная верификация модели на образцах из конструкционных сталей и сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

- Буренин, А. А. К проблеме выделения разрывов в численных расчётах динамики деформирования / А. А. Буренин, Е. А. Герасименко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № V (61). – С. 46-54.

2. Математическое описание исследования деформации стальных изделий, изготовленных из Ст3 при равномерном растяжении / А. Л. Григорьева, И. В. Канахин, С. Д. Хасаншин, К. Д. Хряпенко // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 07-11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 208-210.
3. Хряпенко, К. Д. Проблематика определения материала образца в механике деформируемого твёрдого тела с помощью применения искусственного интеллекта / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 237-240.
4. Хряпенко, К. Д. Решение задач классификации и регрессии при исследовании поведения материала при трещинообразовании / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VIII Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07-11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 600-603.
5. Качанов, Л. М. Основы механики разрушения / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1974. – 336 с.
6. Морозов, Е. М. Механика разрушения: учеб. пособие / Е. М. Морозов. – М.: URSS, 2015. – 320 с.
7. Неймарк, Ю. И. Математическое моделирование в механике деформируемого твёрдого тела / Ю. И. Неймарк. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
8. Панасюк, В. Т. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В. Т. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1968. – 240 с.
9. Петринин, А. А. Жёсткопластические модели разрушения полос при растяжении / А. А. Петринин, В. В. Ершов // Прикладная механика и техническая физика. – 2018. – Т. 59. – № 3. – С. 145-153.
10. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл; пер. с англ. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 408 с.
11. Чередников, В. А. Локализация деформаций и разрушение жёсткопластических тел / В. А. Чередников, А. С. Савинов // Вестник механики сплошных сред. – 2020. – Т. 13. – № 2. – С. 78-89.
12. Хряпенко, К. Д. Двойная свёрточная архитектура для мультимодального прогнозирования трещинообразования в металлических пластинах при одноосном растяжении / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Механики XXI века. – 2026. – № 25. – С. 355-361.
13. Belytschko, T. A survey of computational methods for fracture / T. Belytschko, R. Gracie // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 76, № 8. – P. 1109-1120.
14. Goswami, S. A physics-informed deep learning framework for inversion and surrogate modeling in fracture mechanics / S. Goswami, M. Yin, Y. Yu, G. E. Karniadakis // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2022. – Vol. 399. – P. 115347.
15. Jagtap, A. D. Conservative physics-informed neural networks on discrete domains for conservation laws / A. D. Jagtap, E. Kharazmi, G. E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. – 2020. – Vol. 422. – P. 109783.
16. Karniadakis, G. E. Physics-informed machine learning / G. E. Karniadakis, I. G. Kevrekidis, L. Lu, P. Perdikaris, S. Wang, X. Meng // Nature Reviews Physics. – 2021. – Vol. 3, № 6. – P. 422-440.
17. Kharazmi, E. Variational physics-informed neural networks for solving partial differential equations / E. Kharazmi, Z. Zhang, G. E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. – 2021. – Vol. 446. – P. 110600.
18. Lu, L. DeepXDE: A deep learning library for solving differential equations / L. Lu, X. Meng, Z. Mao, G. E. Karniadakis // SIAM Review. – 2021. – Vol. 63, № 1. – P. 208-228.
19. Onat, E. T. Plastic stress and strain fields at a crack tip / E. T. Onat, W. Prager // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1957. – Vol. 5, № 3. – P. 173-182.
20. Raissi, M. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations / M. Raissi, P. Perdikaris, G. E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. – 2019. – Vol. 378. – P. 686-707.

REFERENCES

1. Burenin A.A., Gerasimenko E.A. K probleme vydeleniya razryvov v chislennykh raschetakh dinamiki deformirovaniya [On the problem of identifying discontinuities in numerical calculations of deformation dynamics]. Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Engineering Sciences], 2022, no. V(61), pp. 46-54. (In Russian). doi: 10.17084/20764359-2022-61-46
2. Grigor'eva A.L., Kanashin I.V., Khasanshin S.D., Khryapenko K.D. Matematicheskoe opisanie issledovaniya deformatsii stal'nykh izdeliy, izgotovlennykh iz St3 pri ravnomernom rastyazhenii [Mathematical description of the study of deformation of steel products made of St3 under uniform tension]. Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idey



- k vnedreniyu: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Science, Innovations and Technologies: from Ideas to Implementation: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Komsomolsk-on-Amur, KnAGU Publ., 2022, pp. 208-210. (In Russian)
3. Khryapenko K.D., Grigor'eva A.L. Problematika opredeleniya materiala obraztsa v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela s pomoshch'yu primeneniya iskusstvennogo intellekta [Problems of determining the material of a sample in deformable solid mechanics using artificial intelligence]. Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idey k vnedreniyu: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh [Science, Innovations and Technologies: from Ideas to Implementation: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists]. Komsomolsk-on-Amur, KnAGU Publ., 2025, pp. 237-240. (In Russian)
 4. Khryapenko K.D., Grigor'eva A.L. Reshenie zadach klassifikatsii i regressii pri issledovanii povedeniya materiala pri treshchinoobrazovanii [Solving classification and regression problems in studying material behavior during crack formation]. Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy: materialy VIII Vserossiyskoy natsional'noy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh [Youth and Science: Actual Problems of Fundamental and Applied Research: Proceedings of the VIII All-Russian National Scientific Conference of Young Scientists]. Komsomolsk-on-Amur, KnAGU Publ., 2025, pp. 600-603. (In Russian)
 5. Kachanov L.M. Osnovy mekhaniki razrusheniya [Fundamentals of fracture mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 336 p. (In Russian)
 6. Morozov E.M. Mekhanika razrusheniya [Fracture mechanics]: textbook. Moscow, URSS Publ., 2015. 320 p. (In Russian)
 7. Neymark Yu.I. Matematicheskoe modelirovanie v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela [Mathematical modeling in deformable solid mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 256 p. (In Russian)
 8. Panasyuk V.T. Predel'noe ravновесие khрупkikh tel s treshchinami [Limit equilibrium of brittle bodies with cracks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1968. 240 p. (In Russian)
 9. Petrinin A.A., Ershov V.V. Zhestkoplasticheskie modeli razrusheniya polos pri rastyazhenii [Rigid-plastic models of strip fracture under tension]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Applied Mechanics and Technical Physics], 2018, vol. 59, no. 3, pp. 145-153. (In Russian)
 10. Khill R. Matematicheskaya teoriya plastichnosti [Mathematical theory of plasticity]. Translated from English. Moscow, GITTL Publ., 1956. 408 p. (In Russian)
 11. Cherednikov V.A., Savinov A.S. Lokalizatsiya deformatsiy i razrushenie zhestkoplasticheskikh tel [Localization of deformations and fracture of rigid-plastic bodies]. Vestnik mekhaniki sploshnykh sred [Bulletin of Continuum Mechanics], 2020, vol. 13, no. 2, pp. 78-89. (In Russian)
 12. Khryapenko K.D., Grigor'eva A.L. Dvoynaya svertochnaya arkhitektura dlya mul'timodal'nogo prognozirovaniya treshchinoobrazovaniya v metallicheskiykh platinakh pri odnoosnom rastyazhenii [Dual convolutional architecture for multimodal crack formation prediction in metal plates under uniaxial tension]. Mekhanika XXI veku [Mechanics of the XXI Century], 2026, no. 25, pp. 355-361. (In Russian)
 13. Belytschko T., Gracie R. A survey of computational methods for fracture. Engineering Fracture Mechanics, 2009, vol. 76, no. 8, pp. 1109-1120.
 14. Goswami S., Yin M., Yu Y., Karniadakis G.E. A physics-informed deep learning framework for inversion and surrogate modeling in fracture mechanics. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, vol. 399, p. 115347.
 15. Jagtap A.D., Kharazmi E., Karniadakis G.E. Conservative physics-informed neural networks on discrete domains for conservation laws. Journal of Computational Physics, 2020, vol. 422, p. 109783.
 16. Karniadakis G.E., Kevrekidis I.G., Lu L., Perdikaris P., Wang S., Meng X. Physics-informed machine learning. Nature Reviews Physics, 2021, vol. 3, no. 6, pp. 422-440.
 17. Kharazmi E., Zhang Z., Karniadakis G.E. Variational physics-informed neural networks for solving partial differential equations. Journal of Computational Physics, 2021, vol. 446, p. 110600.
 18. Lu L., Meng X., Mao Z., Karniadakis G.E. DeepXDE: A deep learning library for solving differential equations. SIAM Review, 2021, vol. 63, no. 1, pp. 208-228.
 19. Onat E.T., Prager W. Plastic stress and strain fields at a crack tip. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1957, vol. 5, no. 3, pp. 173-182.
 20. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. Journal of Computational Physics, 2019, vol. 378, pp. 686-707.

Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.
O. E. Sysoev, E. O. Sysoev

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА СБОРНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

PREDICTION OF WEAR OF INDEXABLE END MILLS WHEN MACHINING PARTS MADE OF HIGH-STRENGTH 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.

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 Economic Sciences, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: fks@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассмотрена обработка заготовок деталей с высокотвёрдым наплавленным покрытием сборной концевой фрезой, имеющей сменные режущие твёрдосплавные пластины, работающие по прогрессивной схеме резания. Поставлен эксперимент, когда сборная концевая фреза условно разбита на три участка (концевой, центральный, хвостовой) и определён износ кромок сменных режущих твёрдосплавных пластин на каждом участке фрезы при обработке заготовки детали с высокотвёрдым наплавленным покрытием. Во время эксперимента проводилась переналадка сменных режущих твёрдосплавных пластин путём поворота их на 90° и выполнялись замеры износа режущих кромок пластин. Установлено, что величина разброса износа кромок сменных режущих твёрдосплавных пластин уменьшается от конца сборной концевой фрезы к центру и затем к хвостовой части фрезы. Даны рекомендации по последовательности изготовления деталей, имеющих высокотвёрдое наплавленное покрытие с использованием фрезы: с начала работы производить фрезерование концевым (дальним от хвостовика) участком фрезы, имеющим наибольший разброс величины износа режущей кромки твёрдосплавных пластин фрезы, производя черновое фрезерование, затем продолжить полустовое фрезерование с использованием центральной части фрезы и в конце технологического цикла включать в чистовую обработку участок у хвостовика фрезы, имеющий наименьший разброс величины износа режущих кромок твёрдосплавных пластин фрезы.

Summary. This article examines the machining of workpieces with a high-hardness deposited coating using a composite end mill with replaceable carbide cutting inserts operating in a progressive pattern. An experiment was conducted in which the composite end mill – a corn-shaped tool – was divided into three sections (end, center, and tail). The wear of the edges of the replaceable carbide cutting inserts was determined in each section of the mill while machining a workpiece with a high-hardness deposited coating. During the experiment, the replaceable carbide cutting inserts were retooled by rotating those 90°, and the wear of the cutting edges of the inserts was measured. It was found that the wear variation of the edges of the replaceable carbide cutting inserts decreases from the end of the composite end mill to the center of the mill and then to the tail of the mill. Recommendations are given for the sequence of machining parts with a high-hardness deposited (surfaced) coating using an end mill. The recommended procedure is as follows: at the beginning of the operation, rough milling should be performed using the end portion of the cutter (the part farthest from the shank), which exhibits the greatest scatter in the wear values of the cutting edges of the carbide inserts. This should be followed by semi-finish milling using the central portion of the cutter. Finally, at the end of the technological cycle, the finish machining should be carried out using the portion of the cutter nearest the shank, which exhibits the smallest scatter in the wear values of the cutting edges of the carbide inserts.

Ключевые слова: сборные концевые фрезы, высокотвёрдые наплавленные покрытия, режущие твёрдосплавные пластины.

Key words: prefabricated end mills, high-hardness deposited coatings, cutting carbide inserts.

УДК 621.9

Введение. Современные условия эксплуатации машин требуют высокопрочных деталей для отдельных узлов и механизмов. При изготовлении высокопрочных деталей часто используют высокотвёрдые наплавленные покрытия на их заготовках. Фрезерование заготовок деталей, имеющих высокотвёрдые наплавленные покрытия (см. рис. 1), часто ведётся с использованием сборных фрез с большим количеством сменных режущих твёрдосплавных пластин, работающих по прогрессивной схеме.

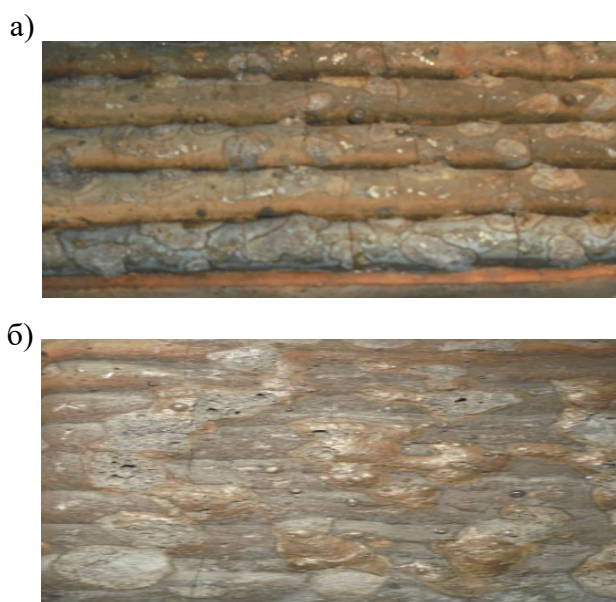


Рис. 1. Высокотвёрдые наплавленные покрытия на заготовках деталей:
а – строчного типа, б – наплавка сплошного типа

Высокопрочные слои на заготовках деталей наплавляются специальной проволокой [1]. При фрезеровании деталей с высокопрочным слоем происходит повышенный износ инструмента, что влияет на точность изготавливаемой детали и стоимость её изготовления [2; 3]. Для снижения производственных затрат часто используются фрезы сложной конструкции типа модели D80 190L-090SK50 R055D12-150. Её длина составляет 190 мм, диаметр 80 мм. Четырёхгранные твёрдосплавные пластины (80 штук) закреплены механически в гнездах для их установки (см. рис. 2). Пластины типовые квадратной формы по мере износа поворачивают вокруг оси крепления для включения в работу новой, неизношенной грани твёрдосплавной пластины.

Проблемой эксплуатации фрезы является неравномерность времени работы твёрдосплавных пластин на отдельных участках фрезы относительно пластин на других её участках при обработке заготовки, ширина которых меньше длины фрезы, и, следовательно, это обуславливает неравномерность износа твёрдосплавных пластин на разных участках (концевой, центральный, хвостовой, см. рис. 3).



Рис. 2. Концевая сборная фреза

Описание эксперимента. При обработке деталей с высокопрочным наплавленным покрытием, ширина которых 45 мм и менее при длине фрезы 150 мм, в резании участвует 25 режущих пластин (по пять пластин, размещённых в пяти заходах фрезы). Условно фрезу можно по-

делить по длине на три участка: концевой (дальний от хвостовика), центральный (расположен в центре фрезы) и хвостовой (находится у хвостовика фрезы).

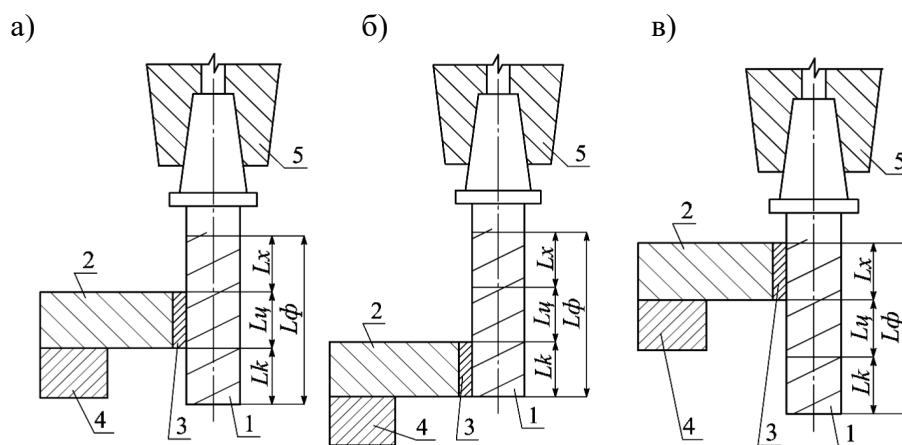


Рис. 3. Три взаимных расположения фрезы и заготовки детали:
 а – концевое положение фрезы относительно заготовки детали;
 б – центральное положение фрезы относительно заготовки детали;
 в – хвостовое положение фрезы относительно заготовки детали;
 1 – корпус фрезы; 2 – заготовка детали; 3 – высокотвёрдый наплавленный слой на заготовке детали; 4 – стол фрезерного станка,
 5 – патрон крепления фрезы; L_k – концевой участок фрезы,
 L_ψ – центральный участок фрезы, L_x – хвостовой участок фрезы

Обработку заготовки детали начали с использования концевой части фрезы. Каждая твёрдосплавная пластина при соответствующей наладке (повороте пластины в гнезде корпуса фрезы) работает четырьмя кромками, т. е. суммарно выборка составит 100 режущих кромок. Определение износа режущих кромок твёрдосплавных пластин фрезы производится только по первым пластинам от начала каждого участка фрезы, на каждом из пяти заходов фрезы, в каждом из четырёх положений режущих кромок пластины.

В дальнейшем заготовку детали размещали так, чтобы её обрабатывал центральный участок фрезы. После обработки детали центральным участком фрезы был измерен износ твёрдосплавных пластин фрезы, как и на концевом участке. Затем заготовку детали смещали так, чтобы работал хвостовой участок фрезы, и также произвели измерение износа режущих кромок твёрдосплавных пластин фрезы.

Износ твёрдосплавных пластин сборной фрезы по заданной грани выполнялся на высокоточном сенсорном измерительном центре модели Micro Vn Sol 161 с оптической системой. Точность измерения износа составила 1 микрон. Результаты измерений приведены в табл. 1, где величина значений измерений ограничена вторым знаком после запятой для более яркого проявления общей тенденции износа твёрдосплавных пластин фрезы [4–7].

Анализ результатов. На концевом участке фрезы после окончания обработки детали разброс износа твёрдосплавных пластин значительный и колеблется от 0,4 до 0,36 мм. После переналадки твёрдосплавных пластин сборной фрезы, соответственно, поворота твёрдосплавных пластин на 90° , 180° , 270° разброс величины их износа составил от 0,02 до 0,03 мм.

При обработке заготовки детали центральной частью фрезы разброс износа режущей кромки твёрдосплавной пластины фрезы в среднем составил 0,02 мм.

При использовании хвостового участка фрезы для фрезерования твёрдосплавной накладки заготовки детали разброс износа режущей кромки твёрдосплавных пластин фрезы составил до 0,01 мм.



Таблица 1

Величина износа режущих пластин при трёх взаимных расположениях фрезы и заготовки детали

Положение пластины в корпусе фрезы	Номера пластин фрезы, на которых контролировали величину износа				
	1	2	3	4	5
Первое (концевое) взаимное расположение фрезы и заготовки детали					
Исходное	0,39	0,40	0,36	0,36	0,36
Пластина повернута на 90°	0,39	0,37	0,39	0,38	0,39
Пластина повернута на 180°	0,38	0,39	0,38	0,36	0,38
Пластина повернута на 270°	0,37	0,38	0,36	0,37	0,37
Второе (центральное) взаимное расположение фрезы и заготовки детали					
Исходное	0,38	0,37	0,35	0,35	0,35
Пластина повернута на 90°	0,36	0,35	0,35	0,34	0,35
Пластина повернута на 180°	0,38	0,35	0,34	0,34	0,33
Пластина повернута на 270°	0,37	0,37	0,33	0,34	0,33
Третье (хвостовое) взаимное расположение фрезы и заготовки детали					
Исходное	0,31	0,31	0,31	0,32	0,31
Пластина повернута на 90°	0,31	0,32	0,31	0,32	0,31
Пластина повернута на 180°	0,31	0,31	0,31	0,32	0,31
Пластина повернута на 270°	0,31	0,31	0,31	0,32	0,31

Примечания:

1. Контролировали износ через 25 мин работы фрезы.
2. Принятые параметры режима резания: скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача на зуб фрезы 0,05 мм/зуб

Динамика разброса износа режущей кромки твёрдосплавных пластин фрезы в зависимости от расположения рабочего участка фрезы от хвостовика показана на рис. 4.

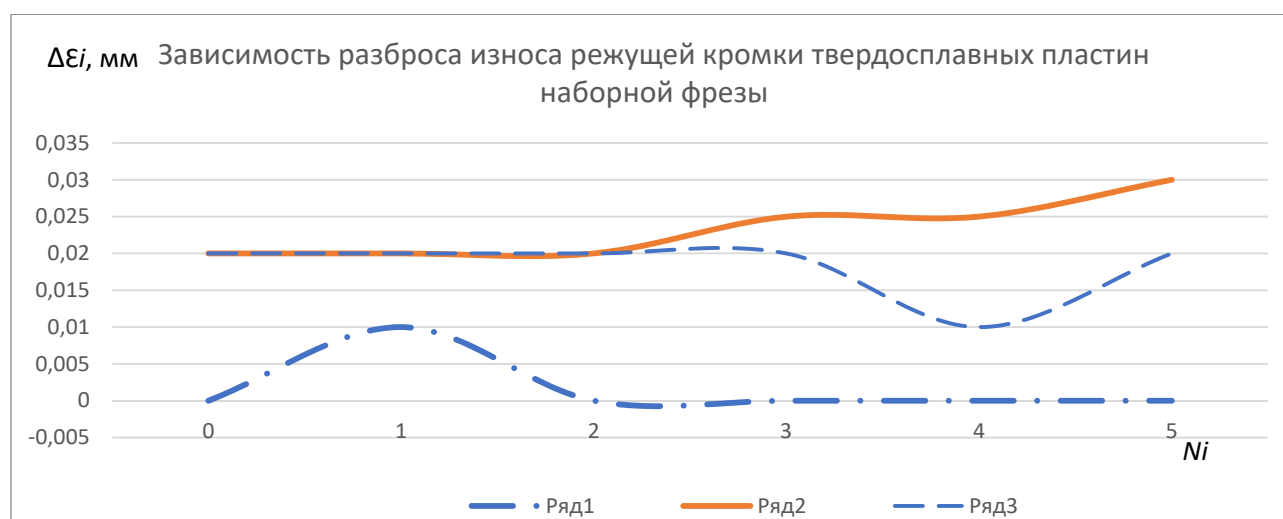


Рис. 4. Зависимость разброса износа режущей кромки твёрдосплавных пластин наборной фрезы. $\Delta \epsilon_i$ – разброс величин износа режущих пластин, мм; N_i – номера пластин, на которых выявлен разброс величины износа режущей кромки; ряд 1 – хвостовой участок фрезы; ряд 2 – концевой участок фрезы; ряд 3 – центральный участок фрезы

По результатам проведённых экспериментов прослеживается тенденция линейного уменьшения величины разброса износа режущей кромки твёрдосплавных пластин наборной фрезы от

концевого участка фрезы к хвостовой части фрезы. Такую закономерность разброса износа твёрдосплавных пластин можно использовать для диагностирования состояния технологической системы резания [8–11].

Заключение. Полученные результаты позволяют рекомендовать последовательность изготовления деталей, имеющих высокотвёрдое наплавляемое покрытие, с использованием фрезы в следующей последовательности: в начале работы производить фрезерование концевым (дальним от хвостовика) участком фрезы, имеющим наибольший разброс величины износа режущей кромки твёрдосплавных пластин фрезы, проводя черновое фрезерование, затем продолжить получистовое фрезерование с использованием центральной части фрезы и в конце технологического цикла включать в чистовую обработку участок у хвостовика фрезы, имеющий наименьший разброс величины износа режущей кромки твёрдосплавных пластин фрезы.

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. Анализ результатов применения инструментов для фрезерования заготовок деталей, имеющих высокую твердость. Часть 1 / Б. Я. Мокрицкий, В. Ю. Шелковников, А. А. Скрипилёв, О. Е. Сысоев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2025. – Т. 21. – № 5. – С. 199-201.
3. Обработка высокотвёрдых наплавов сборными торцовыми фрезами / Б. Я. Мокрицкий, А. В. Космынин, А. А. Скрипилёв, О. Е. Сысоев // Металлообработка. – 2025. – № 1. – С. 3-8.
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. Особенности процессов высокоскоростного фрезерования сложнопрофильным инструментом при обработке алюминиевых сплавов и композиционных материалов / М. С. Вакулин, Ю. И. Гордеев, В. Б. Ясинский и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24. – № 3. – С. 570-588.
6. Остафьев, В. А. Учёт прочности инструмента при его проектировании и эксплуатации / В. А. Остафьев // Станки и инструмент. – 1983. – № 7. – С. 19-20.
7. Исследование обрабатываемости резанием быстрорежущей стали / А. В. Савилов, С. А. Тимофеев, Г. В. Матлыгин, В. А. Ушаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т. 10. – № 1. – С. 14-18.
8. Симонян, М. М. Исследование влияния температурных колебаний и адгезионных явлений на стойкость твёрдосплавного инструмента при прерывистом резании / М. М. Симонян, М. О. Навоян, Н. Э. Казарян // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. – 2022. – Т. 2. – С. 44-54.
9. Deederich N. Metallischer Zwischenschichten im Bereich der Aufbauschneidesbildung. Ind. -Anz., 1968, 90, N 24, p. 457-460.
10. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory // Comp. Phys. Commun. 1999. Vol. 119. P. 67-71.
11. Iochen M. Schneider. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti3Al. Phys. Rev. B 74, 174110, 2006.

REFERENCES

1. Kirichek A.V., Lazutkin A.G., Solovev D.L. Statiko-impulsnaya obrabotka i osnastka dlya ee realizatsii [Static-impulse processing and tooling for its implementation]. STIN, 1999, no. 6, pp. 20-24. (In Russian)
2. Mokritskiy B.Ya., Shelkovnikov V.Yu., Skripilev A.A., Sysoev O.E. Analiz rezultatov primeneniya instrumentov dlya frezerovaniya zagotovok detaley, imeyushchikh vysokuyu tverdost. Chast 1 [Analysis of results of applying tools for milling workpieces of parts with high hardness. Part 1]. Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya [Hardening Technologies and Coatings], 2025, vol. 21, no. 5, pp. 199-201. (In Russian)
3. Mokritskiy B.Ya., Kosmynin A.V., Skripilev A.A., Sysoev O.E. Obrabotka vysokotverdykh naplavok sbornymi tortsovyimi frezami [Machining of high-hardness surfacing deposits with assembled face mills]. Metalloobrabotka [Metalworking], 2025, no. 1, pp. 3-8. (In Russian)
4. Sablin P.A., Shchetinin V.S. Vysota mikronevrovnostey i parametry sherokhovatosti — kompleksnaya otsenka kachestva obrabotannoy poverkhnosti [Height of micro-irregularities and roughness parameters — com-



prehensive assessment of machined surface quality]. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike* [Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Engineering Sciences], 2020, no. VII-1(47), pp. 90-94. (In Russian)

5. Vakulin M.S., Gordeev Yu.I., Yasinsky V.B., et al. Osobennosti protsessov vysokoskorostnogo frezerovaniya slozhnoprofilnym instrumentom pri obrabotke alyuminievykh splavov i kompozitsionnykh materialov [Features of high-speed milling processes with complex-profile tools when machining aluminum alloys and composite materials]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal* [Siberian Aerospace Journal], 2023, vol. 24, no. 3, pp. 570-588. (In Russian)

6. Ostafyev V.A. Uchet prochnosti instrumenta pri ego proektirovanii i ekspluatatsii [Accounting for tool strength in its design and operation]. *Stanki i instrument* [Machine Tools and Tooling], 1983, no. 7, pp. 19-20. (In Russian)

7. Savilov A.V., Timofeev S.A., Matlygin G.V., Ushakov V.A. Issledovanie obrabatyvaemosti rezaniem bystrorezhushchey stali [Study of machinability by cutting of high-speed steel]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2023, vol. 10, no. 1, pp. 14-18. (In Russian)

8. Simonyan M.M., Navoyan M.O., Kazaryan N.E. Issledovanie vliyaniya temperaturnykh kolebaniy i adgezionnykh yavleniy na stoykost tverdosplavnogo instrumenta pri preryvistom rezanii [Study of the effect of temperature fluctuations and adhesive phenomena on the durability of carbide tools in intermittent cutting]. *Vestnik Natsionalnogo politekhnicheskogo universiteta Armenii. Mekhanika, mashinovedenie, mashinostroenie* [Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Mechanics, Machine Science, Mechanical Engineering], 2022, vol. 2, pp. 44-54. (In Russian)

9. Deederich N. Metallischer Zwischeuschichten im Bereich der Aufbanschneidesbildung. *Ind.-Anz.*, 1968, vol. 90, no. 24, pp. 457-460. (In German)

10. 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, pp. 67-71.

11. Schneider J.M. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti33Al. *Phys. Rev. B*, 2006, vol. 74, 174110.

Мокрицкий Б. Я.
B. Ya. Mokritskii

О ПРИМЕНЕНИИ ПОКРЫТИЙ НА ФРЕЗАХ ПРИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

ON COATING APPLICATION ON MILLING CUTTERS FOR ALUMINUM ALLOY COMPLEX PROCESSING

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор, ведущий специалист отдела организации и сопровождения научно-исследовательской деятельности 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 Technical Sciences, Professor, Leading Specialist, Department of Research Activities Organization and Support, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Аннотация. В авиационной промышленности большое количество деталей самолётов разного назначения изготавливают из алюминиевых сплавов разных марок. Физико-механические характеристики таких сплавов отличаются, но практика механической лезвийной обработки монолитными концевыми твёрдосплавными фрезами заготовок деталей не учитывает эти отличия, принято считать, что фреза должна обладать требуемой работоспособностью на заданный период стойкости фрез либо до достижения допустимой величины износа зубьев фрез. В работе изложены некоторые результаты применения в этих целях двузубых указанных фрез диаметром 10 мм при общей длине фрез 100 мм.

Summary. In the aviation industry, a large number of aircraft parts for various purposes are made from aluminum alloys of various grades. The physical and mechanical characteristics of such alloys differ, but the practice of mechanical blade machining with monolithic carbide end mills of workpieces does not take these differences into account, it is generally assumed that the milling cutter must have the required performance for a given period of mill durability or until the permissible wear of the milling teeth is reached. The paper presents some of the results of using these two-pronged cutters with a diameter of 10 mm with a total length of 100 mm.

Ключевые слова: фрезерование твёрдосплавными фрезами, алюминиевые сплавы.

Key words: milling with carbide cutters, aluminum alloys.

УДК 621.9.2

Введение. Авиационная промышленность активно применяет алюминиевые сплавы для большого количества деталей самолётов. Номенклатура сплавов значительная. Сплавы существенно отличаются физико-механическими характеристиками. Для обработки заготовок деталей используют сборные фрезы с механическим креплением режущих пластин и монолитные твёрдосплавные концевые фрезы. Далее рассмотрен опыт применения монолитных твёрдосплавных двузубых фрез диаметром 10 мм.

Объекты и методы исследований. Объектом исследования являются указанные выше фрезы. Использован экспериментальный метод исследования, т. е. непосредственное фрезерование заготовок деталей и последующее измерение величины износа зубьев фрез. Такой метод исследования типичен [1–4].

Полученные результаты. На рис. 1 показан пример обработанных деталей, выполненных из авиационного алюминиевого сплава марки В95счТЗ. Изготовление отверстий (их размер 10 мм) выполняли при скорости резания 120 метров в минуту, все остальные поверхности изготавливали при скорости резания 310 метров в минуту. Глубину резания и подачу на зуб фрезы варьировали в зависимости от покрытия, которое предварительно наносили на режущие поверхности фрезы.

Применяли наноструктурированные покрытия, которые наносили методом конденсации с ионной бомбардировкой. Ниже приведены результаты только для покрытий $Zr + ZrN + (ZrCrSi)N$ (металлический слой циркония толщиной до 1 мкм, на него наносили слой нитрида циркония толщиной 1,5 мкм, на него наносили нитридный слой смеси циркония, хрома и кремния толщиной до 2 мкм) и $Ti + TiN + (TiAlSi)N$ (металлический слой титана толщиной 1,5 мкм, на него наносили слой нитрида титана толщиной 1,5 мкм, на него наносили нитридный слой смеси титана, алюминия и кремния толщиной до 2 мкм).

а)



б)



Рис. 1. Фото фрагментов изготовленных деталей: а – деталь в горизонтальном положении; б – детали в вертикальном положении

Контролировали величину износа зубьев фрезы по их торцу через каждые 5 часов машинного времени работы. В итоге за 30 часов машинного времени работы фрез износ зубьев по торцу составил 0,05 мм с покрытием $Zr + ZrN + (ZrCrSi)N$ и 0,06 мм с покрытием $Ti + TiN + (TiAlSi)N$. Из этого следует, что величины износа отличаются незначительно и нет разницы, какое из покрытий применять [5–8]. Но это преждевременный вывод. Разница покрытий даёт о себе знать при

большем времени работы фрез. Так, например, при 50 часах машинного времени работы износ зубьев по торцу составил 0,08 мм с покрытием $Zr + ZrN + (ZrCrSi)N$ и 0,12 мм с покрытием $Ti + TiN + (TiAlSi)N$. Из этого следует, что работоспособность фрез с покрытием $Zr + ZrN + (ZrCrSi)N$ в 1,5 раза выше, чем с покрытием $Ti + TiN + (TiAlSi)N$. К сведению сообщаем, что применение фрезы без покрытия за 30 часов машинного времени привело к износу фрезы 0,09 мм и за 50 часов – 0,16 мм.

Полученные результаты не противоречат известным публикациям [9–13].

Заключение. Исследование позволило выявить работоспособность фрез с разными покрытиями. Для рассмотренных условий наиболее рационально покрытие $Zr + ZrN + (ZrCrSi)N$ (металлический слой циркония толщиной до 1 мкм, затем слой нитрида циркония толщиной 1,5 мкм, затем нитридный слой смеси циркония, хрома и кремния толщиной до 2 мкм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сысоев, О. Е. Прогнозирование периода стойкости концевых фрез при обработке твёрдосплавных материалов / О. Е. Сысоев, С. Б. Марьин, Е. О. Сысоев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 72-75.
2. Iochen M. Schneider. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti3Al. Phys. Rev. B 74, 174110, 2006.
3. Мокрицкий, Б. Я. Управление фрезерованием высокотвёрдых заготовок / Б. Я. Мокрицкий, А. А. Скрипилёв // Вестник машиностроения. – 2022. – № 12. – С. 72-75.
4. 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.
5. Vereschaka A. A., Grigoriev S. N., Naumov A. G., Sotova E. S., Kirilov A. K., Bublikov J. I. Nanoscale multilayered composite coating – applications for com machining // 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Huajie Chen, Aihui Zhou. Orbital-free Density Functional Theory for Molecular Structure Calculations. Numerical Mathematics: Theory, Methods Applications, 2008, 1, 1-28.
10. Механика деформирования и разрушения при резании / Б. В. Барбышев, У. С. Путилова, Р. Ю. Некрасов и др.; под ред. М. Х. Утешева // Том I. Нестационарный процесс резания. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – 212 с.
11. 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.
12. 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) p. 110-123.
13. 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.

REFERENCES

1. Sysoev O. E., Maryin S. B., Sysoev E. O. Prediction of end mill tool life when machining hard-alloy materials // Scientific Notes of KnGTU. 2025. No. 3 (83). P. 72-75.



2. Iochen M. Schneider. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti3Al. *Phys. Rev. B* 74, 174110, 2006.
3. Mokritsky B. Ya., Skripilev A. A. Control of milling processes for high-hardness workpieces // *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2022. No. 12. P. 72-75.
4. 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.
5. Vereschaka A. A., Grigoriev S. N., Naumov A. G., Sotova E. S., Kirilov A. K., Bublikov J. I. Nanoscale multilayered composite coating – applications for eco-coating // 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.
6. Vereschaka A. A., Grigoriev S. N., Sitnikov N. N., Bataka A. Delamination and longitudinal cracking in multilayered 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.
7. Vereshchaka A. A., Vereshchaka A. S., Grigoriev S. N. Multilayer composite nanostructured coatings for cutting tools operating under severe conditions // *Hardening Technologies and Coatings*. 2012. No. 12. – P. 3-11.
8. Tabakov V. P., Porokhin S. S. Use of multilayer coatings to enhance the performance of cutting tools operating under constrained conditions // *Metalworking*, No. 3, 2010, p. 40-44.
9. Huajie Chen, Aihui Zhou. *Orbital-free Density Functional Theory for Molecular Structure Calculations*. Numerical Mathematics: Theory, Methods Applications, 2008, 1, 1–28.
10. *Mechanics of Deformation and Fracture During Cutting* / B. V. Barbyshev, U. S. Putilova, R. Yu. Nekrasov et al.; ed. by M. Kh. Uteshev. – Volume I. Non-stationary Cutting Process. – Tyumen: TyumGNGU, 2012. – 212 p.
11. 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.
12. Alexey A. Vereschaka, Vladislav Y. Vereshchagin, Nikolay N. Sitnikov, Gaik V. Oganyan, Anatoly Yu. Aksenenko, Boris J Mokritskii. Study of the mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on the Ti-TiN-(ZrNbTi)N system deposited on carbide substrates. *Journal of Nano Research*. Vol. 45 (2017) p. 110-123.
13. 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.

Ваниев Э. Р., Скакун В. В., Джемилов Э. Ш., Джемалядинов Р. М., Алиев А. И., Башкова Т. И.

ВЛИЯНИЕ ПРИРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ ДИСКОВЫХ ФРЕЗ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Ваниев Э. Р., Скакун В. В., Джемилов Э. Ш., Джемалядинов Р. М., Алиев А. И., Башкова Т. И.
E. R. Vaniev, V. V. Skakun, E. Sh. Dzhemilov, R. M. Dzhemalyadinov, A. I. Aliev, T. I. Bashkova

**ВЛИЯНИЕ ПРИРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ ДИСКОВЫХ ФРЕЗ И ШЕРОХОВАТОСТЬ
ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ
БЕЗОПАСНЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

**THE INFLUENCE OF RUNNING-IN ON THE DURABILITY OF DISC CUTTERS
AND THE ROUGHNESS OF THE MACHINED SURFACE UNDER CONDITIONS OF USING
ENVIRONMENTALLY FRIENDLY LUBRICANTS**

Ваниев Эльдар Рустемович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: e.vaniev@kipu-rc.ru.

Eldar R. Vaniev – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: e.vaniev@kipu-rc.ru.

Скакун Владимир Владимирович – преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: vladimir.skakun.92@list.ru.

Vladimir V. Skakun – Lecturer Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: vladimir.skakun.92@list.ru.

Джемилов Эшреб Шефикиевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: eshreb@mail.ru.

Eshreb Sh. Dzhemilov – PhD in Engineering, Head of Mechanical Engineering Technology Department, Fevzi Yakubov Crimean Engineering and Pedagogical University (Russia, Simferopol). E-mail: eshreb@mail.ru.

Джемалядинов Руслан Марленович – преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru.

Ruslan M. Dzhemalyadinov – Lecturer, Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru.

Алиев Азиз Ибрахимович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: alievaziz2704@gmail.com.

Aziz I. Aliev – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: alievaziz2704@gmail.com.

Башкова Татьяна Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: telem01@mail.ru.

Tatyana I. Bashkova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Chemistry and Materials Science Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: telem01@mail.ru.

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на повышение стойкости металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали P6M5K5 за счёт оптимальных режимов приработки в процессе фрезерования нержавеющей стали 12X18H10T дисковыми фрезами с использованием различных по составу смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), в том числе и экологически безопасных. Рассмотрены оптимальные режимы приработки, обеспечивающие наибольшую



стойкость инструмента в процессе резания как всухую, так и с применением различных масел, а именно: минеральных И-40А и МР-99, а также растительных масел (подсолнечного и касторового). Показано преимущество растительных масел в сравнении с аналогичными минеральными маслами при фрезеровании нержавеющей стали быстрорежущим инструментом.

Summary. The article presents the results of experimental studies aimed at increasing the durability of metal-cutting tools made of high-speed steel P6M5K5 (HSS-Co), due to optimal running-in modes in the process of milling stainless steel 12X18H10T (AISI 321) with disk cutters, using various compositions of lubricating and cooling technological means (LCTM), including environmentally friendly ones. Optimal break-in cutting conditions are discussed, ensuring the greatest tool life during both dry cutting and cutting with mineral oils, including industrial И-40А and МР-99, as well as vegetable oils such as sunflower and castor oils. The advantages of vegetable oils over similar mineral oils when milling stainless steel with high-speed cutting tools are demonstrated.

Ключевые слова: приработка, металлорежущий инструмент из быстрорежущей стали, коррозионно-стойкая сталь, фрезерование, режимы резания, стойкость металлорежущего инструмента, смазочно-охлаждающие технологические средства.

Key words: running-in, high-speed steel cutting tool, corrosion-resistant steel, milling, cutting modes, durability of cutting tool, lubricating and cooling technological means.

УДК 621.914

Введение. Повышение эффективности обработки материалов резанием неразрывно связано с обеспечением в том числе высокого качества и требуемых физико-механических свойств поверхности металлорежущего инструмента. Одним из перспективных способов, направленных на решение данной задачи, является применение предварительной приработки, которая в сочетании с различными смазочно-охлаждающими технологическими средствами (СОТС) позволяет сформировать упрочнённые слои на контактной поверхности режущего инструмента. В работах [1–6] приведены результаты исследований по определению влияния предварительной приработки на формирование упрочнённых слоёв металлорежущего инструмента в процессе резания коррозионно-стойкой стали 12X18H10T с применением в качестве СОТС минерального масла, а также различных растительных масел. Показано, что при воздействии на контактные слои инструмента температуры резания в диапазоне от 200 до 400 °С и удельного давления $\sigma_n \geq 500$ МПа формируются упрочнённые структуры, отвечающие в дальнейшем за 5–6-кратное повышение стойкости инструмента.

Согласно экспериментальным исследованиям [1–6] выявлено, что в процессе резания рабочие поверхности режущего инструмента (РИ) подвергаются температурным и контактным нагрузкам, вследствие чего происходит износ таких поверхностей, находящийся в трёх состояниях (см. рис. 1).

На рис. 1 использованы следующие обозначения: H_μ – твёрдость, а также исходное значение твёрдости; σ_b – предел прочности; ΔH_μ – приращение твёрдости,

$$\Delta H_\mu = \begin{cases} 0 & \text{при } 0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C} \\ f_1(\sigma_N) & \text{при } 200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}, \\ f_2(\sigma_N) & \text{при } \theta > 400^\circ\text{C} \end{cases}$$

где $f_1(\sigma_N)$ – функция, возрастающая при выполнении условия $0,5 \text{ ГПа} \leq \sigma_N \leq \sigma_b$; σ_N – нормальное напряжение; $f_2(\sigma_N)$ – убывающая функция.

В зоне I действуют относительно низкие температуры (до 200 °С), при которых процессы деформации в контактной зоне затруднены и не оказывают значительного влияния на структуру при износе инструмента – приращение твёрдости $\Delta H_\mu \approx 0$.

В зоне II действуют температуры от 200 до 400 °С, при которых в процессе деформационного нагружения сталей образуется так называемый горб прочности, что в большей степени гово-

рит о проявлении процессов упрочнения относительно разупрочняющих процессов, а зависимость имеет следующий вид: $\sigma_B = f(\theta)$.

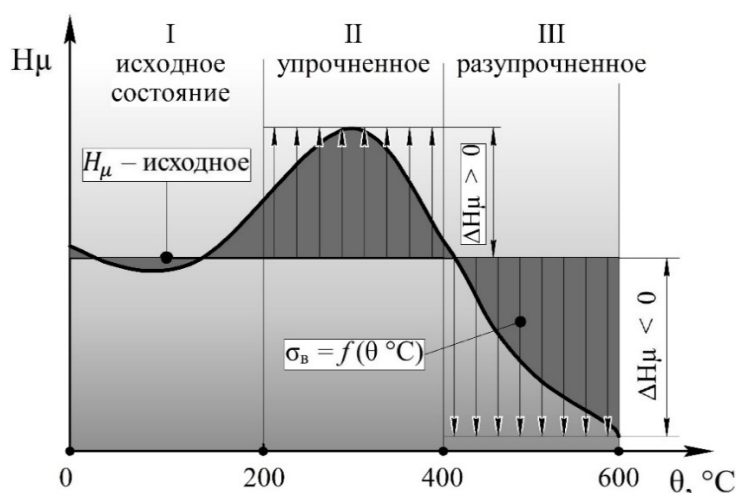


Рис. 1. Схема влияния температуры θ на трансформацию свойств контактных слоёв РИ из быстрорежущей стали [4]

Зона III характеризуется процессами, приводящими к разупрочнению контактных слоёв инструмента ($\Delta H_\mu < 0$), которые способствуют возникновению высоких температур в зоне резания (более 400°C). Использование различных по составу СОТС в таких случаях направлено на замедление процессов, приводящих к разупрочнению, а также на снижение износа и сохранение режущих свойств исходной структуры инструментального материала.

В процессе обработки материалов резанием описанное явление стимулируется благодаря тому, что из-за нагрева предел текучести инструментального материала в контактной зоне в значительной степени падает и нагружающие напряжения, действующие в процессе резания, оказываются достаточными для их пластической деформации. Формирование вторичных упрочнённых структур (зона II) происходит вследствие действия внешнего возмущения, а ответная реакция воспринимающей системы (в данном случае инструментальной основы) компенсирует вызывающую это возмущение причину. При этом проявляется структурная адаптация с последующим образованием вторичных упрочнённых структур, которые обладают прочностными характеристиками, превосходящими исходную.

Согласно работам [1–6], в данном случае происходит формирование вторичных упрочнённых структур, что является результатом действия такого природного явления, как самоорганизация. Для металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали имеет место (для определённых условий) следующий механизм изнашивания, вытекающий из принципа процесса самоорганизации: силовая и тепловая нагрузки контакта $\rightarrow$ пластическая деформация контактных (локальных) микрообъёмов $\rightarrow$ их упрочнение (включая образование химических соединений) $\rightarrow$ изнашивание (усталостное разрушение) исчерпавших запас пластичности адгезионных участков. Также отмечено, что чем интенсивнее происходит упрочнение, тем меньше размеры вырываемых (изнашиваемых) частиц и износ в целом.

В зависимости от обрабатываемого материала, инструментального материала, режимов резания, а также типа механической обработки и вида СОТС механизм формирования упрочнённых структур происходит не одинаково. При этом эффективность последних, в частности, показана в работе [4], в которой использование СОТС на масляной основе приводило к упрочнению контактных слоёв на 60...80 % по сравнению с обработкой без использования СОТС. В рамках исследования использовалась технология минимального смазывания с применением установки MQL (Minimum quantity lubrication), которая позволяет подавать смазочный материал в зону резания порци-

онно (дозированно) в необходимом количестве, значительно снижая при этом расход технологической среды по сравнению с полноструйной подачей СОТС. Эффективность применения таких установок, исследование влияния различных технологических сред на процесс резания, а также изучение механизма износа режущего инструмента рассмотрены в работах [7–12]. На основании представленных данных появилась необходимость определения оптимальных (прирабочных) режимов резания в сочетании с СОТС для наиболее эффективного формирования вторичных упрочнённых структур, отвечающих за дальнейшее повышение стойкости инструмента.

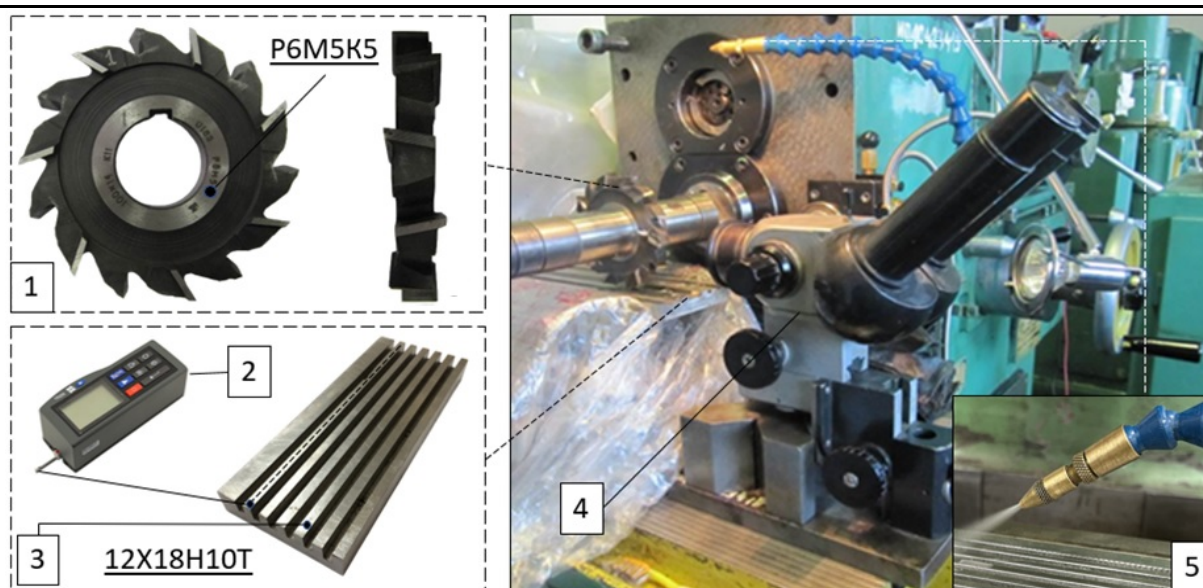
В данной статье рассматривается повышение стойкости металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали с использованием предварительной приработки. Обработка осуществлялась на операции фрезерования нержавеющей стали 12Х18Н10Т в различных средах. В качестве СОТС использовались минеральные масла И-40А и МР-99 (масляная СОЖ «МР-99» применяется в качестве технологической среды при обработке нержавеющей, жаростойких и жаропрочных сталей), а также растительные масла (подсолнечное и касторовое).

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1–6; 13–15] рассматривалось влияние различных СОТС на качество приработки и дальнейшую стойкость режущего инструмента как в условиях непрерывного резания [1–4], так и в процессе прерывистого резания коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т [5; 6; 13–15]. Влияние СОТС, в том числе и экологически безопасных, на качество приработки и, соответственно, упрочнение контактных поверхностей инструмента при точении конструкционной стали 45, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ22 рассматривалось в работе [4]. Обработка указанных материалов осуществлялась при постоянной подаче $S = 0,2$ мм/об и глубине резания $t = 0,5$. Режимы резания в процессе предварительной приработки и стационарных режимах резания отличались лишь значениями скорости резания. Так, при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т скорость резания в процессе приработки составляла $V_{пр} = 15$ м/мин. При этом в работах [5; 6] представлены результаты экспериментальных исследований, направленные на определение оптимальных прирабочных режимов для металлорежущего инструмента, а также исследование влияния режимов резания на стойкость приработанного инструмента при фрезеровании нержавеющей стали 12Х18Н10Т с использованием различных СОТС, в качестве которых выступали минеральные (И-40А, МР-99) и растительные масла (подсолнечное, касторовое). Также обработка осуществлялась без использования СОТС (сухое резание) в диапазоне изменения прирабочных режимов, а именно: скорости резания в процессе приработки $V_{пр} = 12 \dots 28$ м/мин, подачи на зуб $S_z = 0,1 \dots 0,3$ мм/зуб и глубины резания $t = 0,4 \dots 2,0$ мм.

Целью работы является повышение стойкости металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5К5 путём его приработки в процессе фрезерования нержавеющей стали 12Х18Н10Т с использованием минеральных и растительных СОТС.

Методика проведения эксперимента. В процессе исследования влияния режимов резания на стойкость инструмента его предварительная приработка осуществлялась со скоростью резания $V_{пр} = 12$ м/мин и $V_{пр} = 28$ м/мин, и подачей на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб и $S_z = 0,3$ мм/зуб, а также глубиной резания $t = 0,4$ мм и $t = 1,2$ мм. На рис. 2 представлен экспериментальный стенд для исследования влияния приработки режущего инструмента в процессе фрезерования на износ инструмента, а также шероховатость обработанной поверхности.

На основе экспериментальных исследований и с учётом использования каждой из рассматриваемых СОТС определялся критерий приработки. Приработка РИ считалась завершённой, когда кривая $h_{зпр}$ меняла свой наклон ($h_{зпр}$ – фаска износа на задней поверхности приработанного инструмента). Использовалась цельная дисковая трёхсторонняя фреза Ø 100 мм с разнонаправленными зубьями ($Z = 14$), в соответствии с ГОСТ 28527-90 изготовленная из быстрорежущей стали Р6М5К5. Процесс резания осуществлялся двумя зубьями (1-м и 8-м), оставшиеся зубья были намеренно занижены до Ø 95. Связано это с необходимостью создания более интенсивного нагружения на режущие кромки фрезы.



1 – дисковая фреза (вид спереди, вид сбоку); 2 – измеритель шероховатости TR-200;
3 – обрабатываемая заготовка (12X18H10T); 4 – микроскоп модели МБС-1;
5 – дозирующая установка MQL (Minimum quantity lubrication)

Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда, а также схема измерения шероховатости обработанной поверхности

В рамках экспериментов была использована заготовка из нержавеющей стали 12X18H10T, согласно ГОСТ 5632-72, с предварительно выполненными уступами, в количестве 7 штук и длиной 200 мм каждый, в соответствии с количеством проходов. Выбор данного обрабатываемого материала обусловлен его востребованностью в различных отраслях промышленности, особенностью конструктивных свойств, а также сложностью механической обработки. По окончании обработки каждого из выступов осуществлялось измерение фаски износа по задней поверхности РИ. Для данных целей был использован микроскоп модели МБС-1, цена деления которого соответствовала значению 0,007 мм.

Подача СОТС в зону резания осуществлялась при помощи дозирующей установки MQL (Minimum quantity lubrication). Измерение шероховатости обработанной поверхности осуществлялось после каждого прохода фрезы с использованием профилометра модели TR-200. В процессе проведения экспериментальных исследований выявлено, что наибольший эффект от приработки (упрочнения) РИ из быстрорежущей стали достигается при наименьших значениях (в пределах их изменения при исследовании) подачи на зуб и глубины резания, за исключением И-40А, также установлено, что скорость приработки инструмента зависит от используемой в процессе резания среды.

Исследование влияния режимов приработки на стойкость быстрорежущего инструмента. Согласно исследованиям [5], связанным с определением влияния режимов резания на стойкостные параметры режущего инструмента, предварительно приработанного в определённом диапазоне, выявлено, что при «сухой» обработке приработочная скорость резания в указанных предельных значениях не оказывает существенного влияния на износ инструмента, в связи с чем для сокращения времени допускается максимальное значение в пределах исследований, а именно приработочная скорость резания в процессе фрезерования может составлять $V_{пр} = 28$ м/мин. Экспериментальные данные указывают на то, что увеличение приработочной скорости резания, а также подачи на зуб оказывает значительное влияние на снижение стойкости инструмента при условии использования в качестве технологической среды индустриального масла И-40А, в свою очередь, глубина резания, наоборот, незначительно влияет на стойкость инструмента. При исполь-

зовании в качестве технологической среды в процессе приработки минерального масла марки МР-99 подача на зуб оказывает наибольшее влияние на его стойкость, при этом значительно ниже оказывает влияние глубина резания. Исключением является скорость резания, которая не оказывает существенного влияния на стойкость инструмента. При этом с использованием касторового и подсолнечного масел наибольшее влияние на процесс резания оказывают подача на зуб и глубина резания, увеличение которых приводит к снижению стойкости РИ.

Однако влияние глубины резания и подачи РИ проявляется в результате тесной взаимосвязи со скоростью резания. Максимальные значения стойкости инструмента в среде указанных масел достигаются в прирабочей скорости резания $V_{пр} = 28$ м/мин, подаче $S_z = 0,1$ мм/зуб и глубине резания $t = 0,4$ мм.

Согласно проведённым исследованиям [6] выявлено, что наиболее эффективными с позиции повышения стойкости РИ при обработке стали 12Х18Н10Т в условиях использования рассматриваемых СОТС являются следующие прирабочие режимы резания:

1. При «сухом» резании: $V_{пр} = 27$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб и $t = 0,4...0,6$ мм;
2. При использовании И-40А: $V_{пр} = 12...16$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб и $t = 0,4...2,0$ мм;
3. При использовании МР-99: $V_{пр} = 28$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб и $t = 0,4...0,6$ мм;
4. При использовании подсолнечного масла: $V_{пр} = 29$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб и $t = 0,4...0,6$ мм;
5. При использовании касторового масла: $V_{пр} = 28$ м/мин, $S_z = 0,1$ мм/зуб и $t = 0,4$ мм.

С использованием указанного диапазона режимов резания в процессе приработки стойкость РИ не превышает 1...3 %. В связи с тем, что наибольшую стойкость РИ обеспечивают режимы резания с наименьшими (в рамках исследований) подачами, прирабочий период РИ может превысить время, необходимое для фрезерования всей длины заготовки.

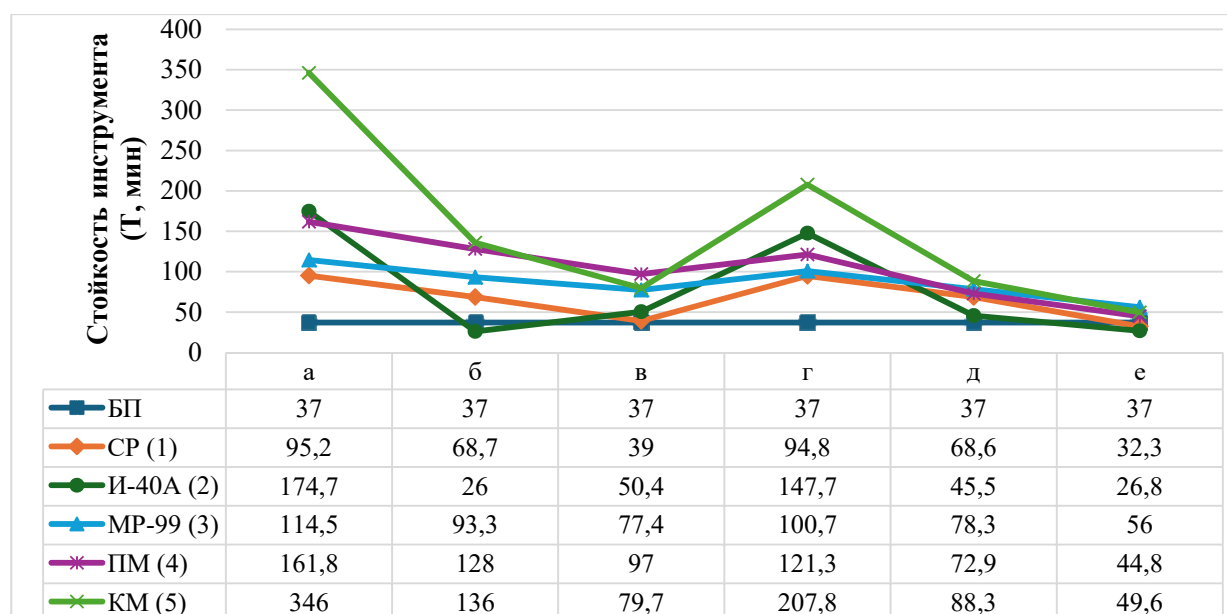
Сократить прирабочий период можно преимущественно путём увеличения подачи на зуб. В свою очередь, согласно исследованиям [5], увеличение подачи на зуб в условиях приработки приводит к снижению стойкости РИ, однако, на основе данных, представленных в работе [6], прирабочий эффект РИ проявляется режимами резания, выбранными в процессе его последующей эксплуатации. В связи с этим возникает задача, направленная на определение влияния прирабочих режимов резания на упрочнение контактных поверхностей РИ в условиях использования различных СОТС.

Обсуждение полученных результатов. В рамках исследования степени упрочнения контактных поверхностей РИ в зависимости от прирабочих режимов резания использовались двухзубые дисковые фрезы, диаметром $\varnothing 100$ мм, изготовленные из быстрорежущей стали Р6М5К5 [6]. В процессе приработки данных фрез применялись режимы резания, обеспечивающие наибольшую стойкость РИ, при этом скорость резания в процессе приработки независимо от используемой СОТС составляла $V_{пр} = 28$ м/мин, подача на зуб $S_z = 0,15$ мм/зуб и $S_z = 0,2$ мм/зуб, а глубина резания $t = 0,4$ мм.

На рис. 3 представлены данные стойкостных параметров РИ в процессе фрезерования стали 12Х18Н10Т, приработанного в различных средах.

После предварительной приработки РИ в условиях различных СОТС дальнейшая эксплуатация фрезы осуществлялась на стационарных режимах резания, при которых скорость резания составляла $V_c = 28$ м/мин и $V_c = 40$ м/мин, подача инструмента $S_z = 0,2$ мм/зуб, а глубина резания $t = 0,5$ мм. В процессе проведения экспериментов измерение износа фрезы осуществлялось по задней поверхности, а в качестве критерия износа была принята величина, равная $h_z = 0,3$ мм. Эффективность приработки РИ с использованием различных режимов резания в условиях применения минеральных и растительных СОТС определяется по отношению к стойкости РИ без предварительной приработки, работающего в условиях «сухого» резания, скорость которого составляла $V_c = 28$ м/мин, подача на зуб $S_z = 0,2$ мм/зуб, а глубина резания $t = 0,5$ мм. Проведя анализ стойкостных параметров РИ, приработанного на различных режимах резания, а также дальнейшей его эксплуатации на стационарных режимах резания видим, что эффективность приработки РИ, а следовательно, упрочнения его контактных поверхностей зависит не только от режимов резания и

вида СОТС, но и от условий дальнейшей его эксплуатации. При использовании в процессе приработки скорости резания, равной $V_{пр} = 28$ м/мин, резкое снижение эффекта упрочнения может быть вызвано увеличением подачи РИ до 0,2 мм/зуб, в свою очередь, эффект от использования СОТС в период приработки проявляется не одинаково. Эффективность процесса приработки определяется отношением стойкости приработанного РИ, эксплуатация которого осуществляется на рассматриваемых режимах резания, к стойкости РИ без предварительной приработки при условии «сухого» резания с использованием стационарных режимов резания. Например, сравнивая обработку резанием с использованием РИ без предварительной приработки с приработанным РИ в условиях эксплуатации различных СОТС, получаем следующие стойкостные характеристики: стойкость РИ увеличивается при использовании в качестве СОТС масла МР-99 (в 2 раза), подсолнечного (в 2,7 раз) и касторового (в 2,2 раза) относительно не приработанного инструмента, эксплуатация которого осуществлялась без использования технологических сред (всухую).



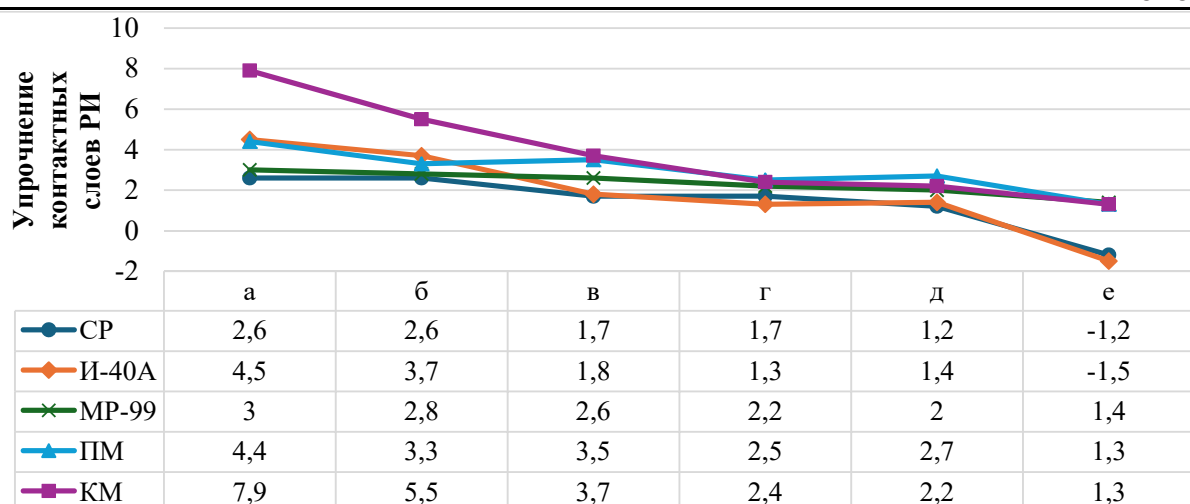
БП – без приработки; СР (1) – сухое резание; И-40А (2) – индустриальное масло; МР-99 (3); ПМ (4) – подсолнечное масло; КМ (5) – касторовое масло

Рис. 3. Стойкость не приработанного и предварительно приработанного РИ с использованием различных СОТС

Режимы приработки: а, г – $V_{пр} = 28$ м/мин (1, 3, 4, 5), $V_{пр} = 12$ м/мин (2), $S_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм; б, д – $V_{пр} = 28$ м/мин, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм; в, е – $V_{пр} = 28$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм; а, б, в, г – $V_c = 28$ м/мин; д, е – $V_c = 40$ м/мин

На рис. 4 приведены данные упрочнения контактных слоёв режущего инструмента в зависимости от режимов резания в процессе приработки, а также режимов его последующей эксплуатации в условиях использования минеральных и растительных СОТС.

Анализ представленных данных (см. рис. 4) свидетельствует о том, что качество приработки, а следовательно, и упрочнение контактных слоёв РИ снижается при повышении режимов резания в процессе приработки (до $V_c = 40$ м/мин), а также условий его дальнейшей эксплуатации (в данном случае от скорости резания). В свою очередь, степень изменения эффекта упрочнения контактных слоёв РИ от скорости резания в процессе приработки определяется применяемой СОТС, а также скоростью резания в процессе дальнейшей его эксплуатации.



CP – сухое резание; И-40А – индустриальное масло; МР-99;

ПМ – подсолнечное масло; КМ – касторовое масло

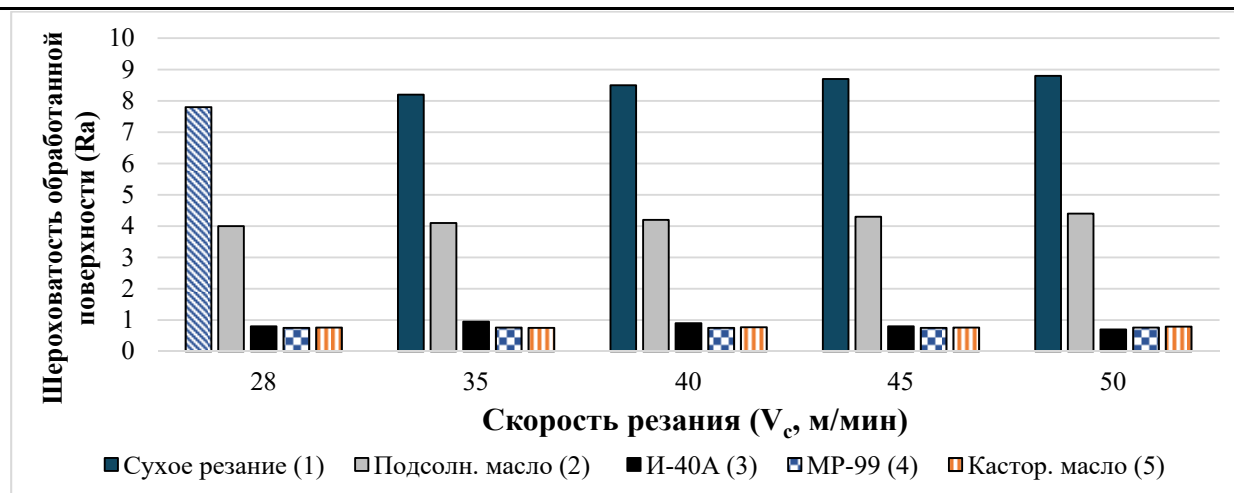
Рис. 4. Влияние приработки на упрочнение контактных слоев РИ:

режимы приработки: для а, б – $V_{пр} = 28$ м/мин, (И-40А – 12 м/мин), $S_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 0,4$ мм;
в, г – $V_{пр} = 28$ м/мин, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм; д, е – $V_{пр} = 28$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм;
стационарные режимы резания: а – $V_c = 28$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм;
б – $V_c = 40$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм; в – $V_c = 28$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм;
г – $V_c = 40$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм; д – $V_c = 28$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм;
е – $V_c = 40$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм

Данное обстоятельство даёт возможность выбирать СОТС с наибольшей эффективностью для определённых режимов резания при эксплуатации РИ после предварительной приработки и обработки коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, а также применить оптимальные приработочные режимы резания с учётом упрочняющего эффекта и путей повышения его эксплуатационных характеристик.

На рис. 5 представлены экспериментальные данные по исследованию влияния скорости резания в интервале от 28 до 48 м/мин на шероховатость обработанной поверхности. Показано, что данный диапазон скоростей резания не оказывает существенного влияния на изменение шероховатости обработанной поверхности, за исключением обработки без использования СОТС (всухую) и с использованием подсолнечного масла.

Заключение. В результате проведённых экспериментальных исследований выявлено, что стойкость режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5К5 после предварительной приработки в процессе фрезерования коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т в условиях применения различных СОТС, в том числе и растительных, определяется как приработочными режимами, так и режимами его дальнейшей эксплуатации. Данное обстоятельство позволяет назначить как более жёсткие режимы приработки, так и увеличить стационарные режимы резания при дальнейшей эксплуатации РИ.



1 – сухое резание; 2 – подсолнечное масло; 3 – И-40А;
4 – МР-99; 5 – касторовое масло; $S_z = 0,3$ мм/зуб; $t = 0,4$ мм

Рис. 5. Влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности при фрезеровании ($R_a = f(V_c)$)

Установлено, что при одних и тех же режимах предварительной приработки РИ и стационарных режимах резания при использовании экологически безопасных СОТС (подсолнечного и касторового масел) эффект упрочнения контактных слоёв инструмента в 1,5...2,0 раза выше, в сравнении с другими СОТС на минеральной основе. Эффект от растительных масел может быть также связан с изменениями соотношения зон пластического и упругопластического контакта и напряжённно-деформированного состояния зоны резания, влияющего на процесс стружкообразования и качество приработки.

Данное обстоятельство даёт возможность рекомендовать подсолнечное и касторовое масло в качестве СОТС для их использования в процессе предварительной приработки РИ на заниженных режимах резания с последующим переходом на стационарные режимы при фрезеровании коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, В. А. Влияние приработки рабочих поверхностей быстрорежущего инструмента на его стойкость: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Ким Владимир Алексеевич. – Ташкент – Киев, 1983. – 183 с.
2. Каримов, Ш. А. Повышение износостойкости инструмента на основе интенсификации упрочнения его рабочих поверхностей в процессе резания: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Каримов Шоирджан Ахрало-вич. – Ташкент – Киев, 1987. – 145 с.
3. Якубов, Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким. – Симферополь: Крымское учебно-педагогическое государственное изд-во, 2005. – 300 с.
4. Якубов, Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь: ОАО Симферопольская городская типография (СГТ), 2008. – 156 с.
5. Повышение стойкости концевой фрезы при обработке титановых сплавов за счёт приработки / Э. Р. Ваниев, Э. Ш. Джемилов, Э. Л. Бекиров [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2026. – № I (89). – С. 115-120.
6. Установление критерия предварительной приработки инструмента при фрезеровании нержавеющей стали / Э. Р. Ваниев, Э. Ш. Джемилов, И. Э. Теминдаров, В. В. Скакун // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 11 (776). – С. 35-44.
7. Возможности использования микрокапсулированных СОТС направленного действия для обеспечения экологической и пожарной безопасности технологических процессов текстильного машиностроения / А. Г. Наумов, С. А. Сырбу, Н. А. Таратанов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2024. – № 5 (413). – С. 211-220.



8. Изменение контактной зоны при резании сплавов в присутствии кислородсодержащих смазочно-охлаждающих сред / А. Г. Наумов, С. А. Сырбу, Н. А. Таратанов, А. С. Митрофанов // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – № 5. – С. 446-455.
9. Косогова, Ю. П. Модернизация системы охлаждения фрезы при механической обработке деталей внутрикорпусного устройства ВВЭР / Ю. П. Косогова, А. Г. Федотов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21. – № 4. – С. 222-230.
10. Импортзамещение СОЖ для процессов металлообработки на машиностроительных предприятиях / С. М. Пилюгин, А. Н. Абрамов, В. С. Жернаков [и др.] // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 12 (24). – С. 42-49.
11. Патент 202624 Российская Федерация, МПК B05B 1/00. Устройство для подачи смазывающих технологических сред: № 2020127167: заявл. 12.08.2020: опубл. 01.03.2021 / В. А. Ким, Ч. Ф. Якубов, Э. Ш. Джемилов, В. В. Скакун. – 6 с.
12. Анцев, А. В. Учёт влияния износа режущего инструмента на разрушение режущей кромки в обобщённой модели отказов режущего инструмента / А. В. Анцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 6. – С. 273-279.
13. Бесарабець, Ю. Й. Математичне моделювання стійкості циліндричних фрез, зміцнених з використанням різних модифікованих охолоджуючих технічних середовищ / Ю. Й. Бесарабець, Е. Р. Ванієв Ч. Ф. Якубов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – № 4 (63). – С. 8-11.
14. Сысоев, О. Е. Прогнозирование периода стойкости концевых фрез при обработке высокотвёрдых материалов / О. Е. Сысоев, С. Б. Марьин, Е. О. Сысоев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № 3 (83). – С. 72-75.
15. Влияние режимов резания на стойкость фрезы с использованием различных СОТС / Э. Р. Ванієв, Э. Ш. Джемилов, Э. Л. Бекиров, А. В. Крыжановский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. В 2 частях, Гомель, 24-25 апреля 2025 года. – Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, 2025. – С. 72-75.

REFERENCES

1. Kim V.A. Vliyanie prirabotki rabochikh poverkhnostey bystrorezhushchego instrumenta na ego stoykost [Effect of running-in of high-speed tool working surfaces on its durability]. Kand. Diss. Tashkent – Kiev, 1983. 183 p. (In Russian)
2. Karimov Sh.A. Povyshenie iznosostoykosti instrumenta na osnove intensifikatsii uprochneniya ego rabochikh poverkhnostey v protsesse rezaniya [Increasing tool wear resistance based on intensification of hardening of its working surfaces during cutting]. Kand. Diss. Tashkent – Kiev, 1987. 145 p. (In Russian)
3. Yakubov F.Ya., Kim V.A. Strukturno-energeticheskie aspekty uprochneniya i povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta [Structural and energetic aspects of hardening and increasing cutting tool durability]. Simferopol, Krymskoe uchebno-pedagogicheskoe gosudarstvennoe izd-vo Publ., 2005. 300 p. (In Russian)
4. Yakubov Ch.F. Uprochnyayushchee deystvie SOTS pri obrabotke metallov rezaniem [Hardening effect of lubricating-cooling technological media during metal cutting]. Simferopol, OAO Simferopolskaya gorodskaya tipografiya (SGT) Publ., 2008. 156 p. (In Russian)
5. Vaniev E.R., Dzhemilov E.Sh., Bekirov E.L., et al. Povyshenie stoykosti kantsevoy frezy pri obrabotke titanovykh splavov za schet prirabotki [Increasing end mill durability during titanium alloy machining through running-in]. Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Technical Sciences], 2026, no. I(89), pp. 115-120. (In Russian)
6. Vaniev E.R., Dzhemilov E.Sh., Temindarov I.E., Skakun V.V. Ustanovlenie kriteriya predvaritelnoy prirabotki instrumenta pri frezerovanii nerzhavayushchikh staley [Determination of the criterion for preliminary tool running-in during milling of stainless steels]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie [Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering], 2024, no. 11(776), pp. 35-44. (In Russian)
7. Naumov A.G., Syrbu S.A., Taratanov N.A., et al. Vozmozhnosti ispolzovaniya mikrokapsulirovannykh SOTS napravlennoy deystviya dlya obespecheniya ekologicheskoy i pozharnoy bezopasnosti tekhnologicheskikh protsessov tekstilnogo mashinostroeniya [Possibilities of using microencapsulated directed-action lubricating-cooling technological media for ensuring environmental and fire safety of textile machinery technological processes]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti [Proceedings of Higher Educational Institutions. Technology of Textile Industry], 2024, no. 5(413), pp. 211-220. (In Russian)

8. Naumov A.G., Syrbu S.A., Taratanov N.A., Mitrofanov A.S. Izmenenie kontaktной зоны pri rezanii splavov v prisutstvii kislorodsoderzhashchikh smazочно-okhlazhdayushchikh sred [Change of the contact zone during alloy cutting in the presence of oxygen-containing lubricating-cooling media]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2023, vol. 44, no. 5, pp. 446-455. (In Russian)
9. Kosogova Yu.P., Fedotov A.G. Modernizatsiya sistemy okhlazhdeniya frezy pri mekhanicheskoy obrabotke detaley vnutrikorpusnogo ustroystva VVER [Modernization of the mill cooling system during machining of VVER internal core device parts]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Herald of Voronezh State Technical University], 2025, vol. 21, no. 4, pp. 222-230. (In Russian)
10. Pilyugin S.M., Abramov A.N., Zhernakov V.S., et al. Importozameshchenie SOZh dlya protsessov metalloobrabotki na mashinostroitelnykh predpriyatiyakh [Import substitution of cutting fluids for metalworking processes at machine-building enterprises]. *Transportnoe mashinostroenie* [Transport Engineering], 2023, no. 12(24), pp. 42-49. (In Russian)
11. Kim V.A., Yakubov Ch.F., Dzhemilov E.Sh., Skakun V.V. Ustroystvo dlya podachi smazyvayushchikh tekhnologicheskikh sred [Device for feeding lubricating technological media]. Patent RF, no. 202624, 2021. (In Russian)
12. Antsev A.V. Uchet vliyaniya iznosa rezhushchego instrumenta na razrushenie rezhushchey kromki v obobshchennoy modeli otkazov rezhushchego instrumenta [Accounting for the effect of cutting tool wear on cutting edge fracture in a generalized model of cutting tool failures]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2019, no. 6, pp. 273-279. (In Russian)
13. Besarabets Yu.Yo., Vaniev E.R., Yakubov Ch.F. Matematychni modelyuvannya stijkosti tsylindrychnykh frez, zmitsnennykh z vykorystannyam riznykh modyfikovanykh okholodzhuyuchykh tekhnichnykh seredovyshch [Mathematical modeling of the durability of cylindrical mills hardened using various modified cooling technical media]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Herald of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences], 2012, no. 4(63), pp. 8-11. (In Ukrainian)
14. Sysoev O.E., Maryin S.B., Sysoev E.O. Prognozirovanie perioda stoykosti kantsevykh frez pri obrabotke vysokotverdykh materialov [Prediction of the durability period of end mills during machining of high-hardness materials]. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike* [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural and Technical Sciences], 2025, no. 3(83), pp. 72-75. (In Russian)
15. Vaniev E.R., Dzhemilov E.Sh., Bekirov E.L., Kryzhanovsky A.V. Vliyanie rezhimov rezaniya na stoykost frezy s ispolzovaniem razlichnykh SOTS [Effect of cutting parameters on mill durability using various lubricating-cooling technological media]. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroeniya, energetiki i upravleniya: materialy XXV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Research and Development in Mechanical Engineering, Energy and Management: Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Gomel, 24–25 April 2025. Gomel, Gomel State Technical University named after P.O. Sukhogo Publ., 2025, pp. 72-75. (In Russian)

Старцев Е. А., Бахматов П. В.
E. A. Startsev, P. V. Bakhmatov

**ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СОСТАВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ
АВТОВАКУУМА**

**FEATURES OF THE STRUCTURE AND COMPOSITION OF AN IRON-CONTAINING
MATERIAL BASED ON METALLURGICAL SLAG OBTAINED UNDER AUTOVACUUM
CONDITIONS**

Старцев Егор Андреевич – старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Egor A. Startsev – Senior Lecturer, Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В работе рассмотрены особенности строения и локального химического состава железосодержащего материала на основе металлургического шлака, полученного в условиях автовакуума. Основное внимание сосредоточено на анализе зональной неоднородности образца и распределения химических элементов по его сечению. Исследование выполнено с применением сканирующей электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального анализа. Установлено, что по сечению материала формируются светлая, серая и чёрная зоны, различающиеся по контрасту, морфологии и соотношению структурных составляющих. Показано, что переход между ними имеет постепенный характер и сопровождается изменением локального содержания железа, кальция, кремния, марганца, алюминия, магния и углерода. Выявлено, что отдельные участки образца различаются не только по общему уровню содержания железа, но и по степени выраженности минеральной составляющей шлакового происхождения. Установлено, что после спекания образуется железосодержащий материал сложного состава с выраженной зональной и химической неоднородностью, что позволяет рассматривать его как многофазную систему, сформированную в условиях неполного выравнивания материала по объёму образца.

Summary. The paper considers the features of the structure and local chemical composition of an iron-containing material based on metallurgical slag obtained under autovacuum conditions. The main attention is focused on the analysis of the zonal heterogeneity of the sample and the distribution of chemical elements over its cross-section. The study was performed using scanning electron microscopy and local X-ray spectral analysis. It has been established that light, gray, and black zones are formed along the cross section of the material, differing in contrast, morphology, and the ratio of structural components. It is shown that the transition between them is gradual and is accompanied by changes in the local content of iron, calcium, silicon, manganese, aluminum, magnesium, and carbon. It was revealed that individual sections of the sample differ not only in the overall level of iron content, but also in the degree of severity of the mineral component of slag origin. It has been established that after sintering, an iron-containing material of complex composition with pronounced zonal and chemical heterogeneity is formed, which makes it possible to consider it as a multiphase system formed under conditions of incomplete alignment of the material over the sample volume.

Ключевые слова: металлургический шлак, железосодержащий материал, автовакуум, зональное строение, химический состав, SEM, EDS, химическая неоднородность.

Key words: metallurgical slag, iron-containing material, autovacuum, zonal structure, chemical composition, SEM, EDS, chemical heterogeneity.

УДК 621.762.5

Введение. Metallurgical slags are considered as a complex multicomponent raw material, in which iron-containing, oxide and silicate components [1–3]. During their thermal processing, a special interest represents not only the possibility of obtaining a sintered material, but also the character of redistribution of components in its volume. For such systems, precisely the internal structure in many ways determines the behavior of the material after sintering, since an uneven distribution of phases and elements leads to the formation of regions, differing in morphology, composition and properties [4–6].

For iron-containing materials based on metallurgical slag, obtained in autovacuum conditions [7], the question of local non-uniformity acquires a special significance. In such conditions in the sample, regions with different degrees of transformation of the original raw material can be preserved simultaneously. Part of the volume turns out to be more iron-rich, while in other zones a stronger influence of the mineral composition of the slag of origin is manifested. As a result of this, the sintered material should be considered not as a homogeneous system, but as an object with a possible zonal structure, requiring separate analysis [8–9].

The most informative methods for solving this task are scanning electron microscopy and local x-ray spectral analysis. Their application allows to trace the distribution of structural components by sectioning the sample, to identify regions of different contrast and to establish how the content of main elements changes within the light, gray and dark zones. Such an approach gives the opportunity to move from a general description of the material to a more accurate interpretation of its internal organization.

The goal of the present work is the analysis of the structure and local chemical composition of iron-containing material based on metallurgical slag, obtained in autovacuum conditions. The main attention is concentrated on revealing zonal non-uniformity of the sample, characteristics of transition regions and evaluation of the distribution of main chemical elements by its sectioning.

Методика эксперимента. As the starting material, metallurgical slag of a steel-making enterprise AO «Amurstal» was used. The formation of a sintered sample based on metallurgical slag in autovacuum conditions has already been considered in the work [10]. In the present article, the main attention is concentrated on the analysis of the structure of the sample by its sectioning and evaluation of the local chemical composition of separate regions of the material.

For the study of the internal structure, a sample, obtained after sintering, in which by sectioning light, gray and black zones, as well as transition regions between them, were identified. The analysis of morphological features of the material was carried out by the method of scanning electron microscopy on a scanning electron microscope SEMS-3400N. Observations were carried out in the regimes of registration of secondary and backscattered electrons, which allowed to evaluate the surface relief, the character of the distribution of structural components and the difference of separate regions by contrast.

The local chemical composition of the material was determined by the method of x-ray spectral microanalysis in selected points and by separate characteristic regions of the sample. Such an approach made it possible to compare the features of the structure of light, gray and black zones with the content of main elements and to trace the change in composition in transition regions. The obtained results were used for the analysis of zonal non-uniformity of the sintered material and interpretation of its internal structure.

Результаты и обсуждение. According to macro- and microscopic analysis, it is established that after sintering the sample is not homogeneous by sectioning. In its structure, it is clearly traced that zonal non-uniformity, expressed in the alternation of light, gray and black regions, is

ющихся по контрасту и характеру распределения структурных составляющих. В связи с этим дальнейший анализ строения и локального химического состава целесообразно проводить с учётом зонального деления образца, последовательно рассматривая как основные области, так и переходные участки между ними.

По сечению образца отчётливо выявляется зональное строение. В макроструктуре последовательно выделяются светлая, серая и чёрная зоны, различающиеся по тону, протяжённости и характеру перехода друг в друга (см. рис. 1). Светлая зона располагается в периферийной части образца и визуально отличается большей выраженностью светлых участков. Серая зона занимает промежуточное положение и имеет более смешанный характер строения. Чёрная зона приурочена к глубинной части образца и характеризуется наибольшей выраженностью тёмной составляющей. Границы между указанными зонами не являются резкими. Переход от одной области к другой осуществляется постепенно, что указывает на неравномерное протекание процессов структурного преобразования по объёму материала. Такая картина позволяет рассматривать полученный образец как зонально неоднородную систему, в которой различия макростроения отражают изменение внутреннего строения и состава по сечению.



Рис. 1. Макроснимок полученного образца

Анализ переходных участков показывает, что границы между основными зонами образца не являются резкими и имеют выраженный переходный характер (см. рис. 2). На SEM-изображениях хорошо видно, что изменение структуры происходит постепенно, за счёт перераспределения светлых и тёмных составляющих, а также изменения степени дисперсности материала.

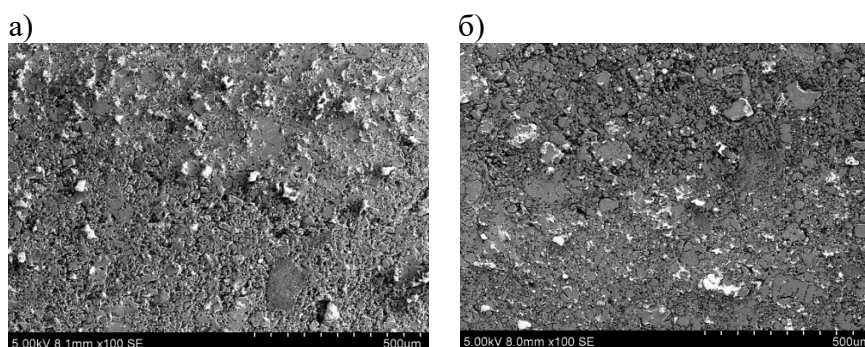


Рис. 2. Переходные участки между основными зонами образца:
а – переход от светлой зоны к серой, б – переход от серой зоны к чёрной

На участке перехода между серой и чёрной зонами структура отличается более развитой тонкодисперсной матрицей, внутри которой распределены отдельные более крупные частицы неправильной формы. Светлые выделения здесь немногочисленны и локализованы неравномерно. Основную часть изображения занимает сравнительно мелкая масса со сложным рельефом и размытым разграничением отдельных составляющих. Такая картина указывает на возрастание роли матричной фазы и на снижение доли более плотных выделений по мере перехода к чёрной зоне. В

целом данный участок характеризуется повышенной структурной неоднородностью и более выраженной дисперсностью.

На участке перехода между светлой и серой зонами, напротив, отчётливее проявляются более крупные и более оформленные частицы. Они распределены в объёме достаточно равномерно, хотя и не образуют сплошной непрерывной структуры. Между ними сохраняется мелкодисперсная связующая масса, однако её роль выражена слабее, чем в переходе к чёрной зоне. По сравнению с предыдущим участком здесь заметно выше доля крупных плотных фрагментов и ниже степень общей дисперсности. Это позволяет рассматривать данный переход как область постепенного ослабления светлой составляющей без резкого изменения характера строения.

При просмотре двух переходных участков видно, что структура образца по сечению меняется постепенно. При движении от светлой зоны к серой крупных плотных частиц становится меньше, а более мелкой фракции больше. Далее, в чёрной зоне, структура становится ещё более неоднородной и на первый план выходит матричная фаза. В итоге переходные участки показывают, что материал устроен градиентно: после спекания получается не однородная система, а структура, в которой соотношение составляющих плавно меняется от края к краю.

Рассмотрим особенности строения каждой из выделенных зон отдельно. Светлая зона характеризуется наиболее выраженным развитием светлой структурной составляющей. На BSE-изображении (см. рис. 3, а) хорошо видно, что основную часть поля зрения занимают сравнительно крупные светлые участки неправильной формы, разделённые более тонкими прослойками промежуточной и тёмной фазы. Светлые выделения распределены достаточно плотно и местами образуют разветвлённую систему, в которой отдельные фрагменты либо соприкасаются, либо разделены узкими межфазными промежутками. Такая картина позволяет считать, что именно в пределах светлой зоны наиболее полно проявляется плотная железосодержащая составляющая материала.

На изображении в режиме SE (см. рис. 3, б) форма этих участков читается более отчётливо. Видно, что светлая зона сформирована не из изолированных округлых зёрен, а из частиц неправильной, местами вытянутой и разветвлённой формы. Границы между отдельными фрагментами выражены неровно. Это указывает на сложное формирование структуры в процессе спекания, при котором происходило частичное срастание и перераспределение вещества, но без полного структурного выравнивания.

Тёмная составляющая в светлой зоне присутствует в меньшем количестве и в основном локализуется в межзёренных промежутках. Она образует сравнительно тонкую матричную основу, в пределах которой располагаются более крупные светлые участки. При этом полностью однородной структура не является. Даже в пределах светлой зоны сохраняются области различного контраста, что указывает на внутреннюю неоднородность материала и на наличие нескольких структурных составляющих.

В целом светлая зона может быть охарактеризована как область с наибольшей долей плотной светлой фазы и с наиболее выраженным развитием крупных структурных фрагментов. По сравнению с серой и чёрной зонами она отличается меньшей дисперсностью и более высокой степенью структурной однородности, однако полного выравнивания строения и в этой части образца не наблюдается.

Серая зона занимает промежуточное положение между светлой и чёрной областями и по характеру строения сочетает признаки обеих. На BSE-изображении (см. рис. 3, в) хорошо видно, что в её пределах присутствуют сравнительно крупные светлые участки неправильной формы, однако они распределены менее плотно, чем в светлой зоне, и разделены более развитой матричной составляющей. Светлые выделения здесь остаются достаточно заметными, но уже не образуют столь выраженной разветвлённой системы. За счёт этого общая картина выглядит более смешанной и менее контрастной.

На изображении в режиме SE (см. рис. 3, г) структура серой зоны проявляется как система частиц различного размера и формы, между которыми сохраняется значительный объём межзёренного пространства. Светлые фрагменты имеют в основном неправильную, местами угловатую форму и разделены тонкодисперсной связующей массой. По сравнению со светлой зоной здесь

отчётливее выражена раздробленность структуры и выше роль матрицы, однако сплошного доминирования тёмной составляющей, характерного для чёрной зоны, ещё не наблюдается.

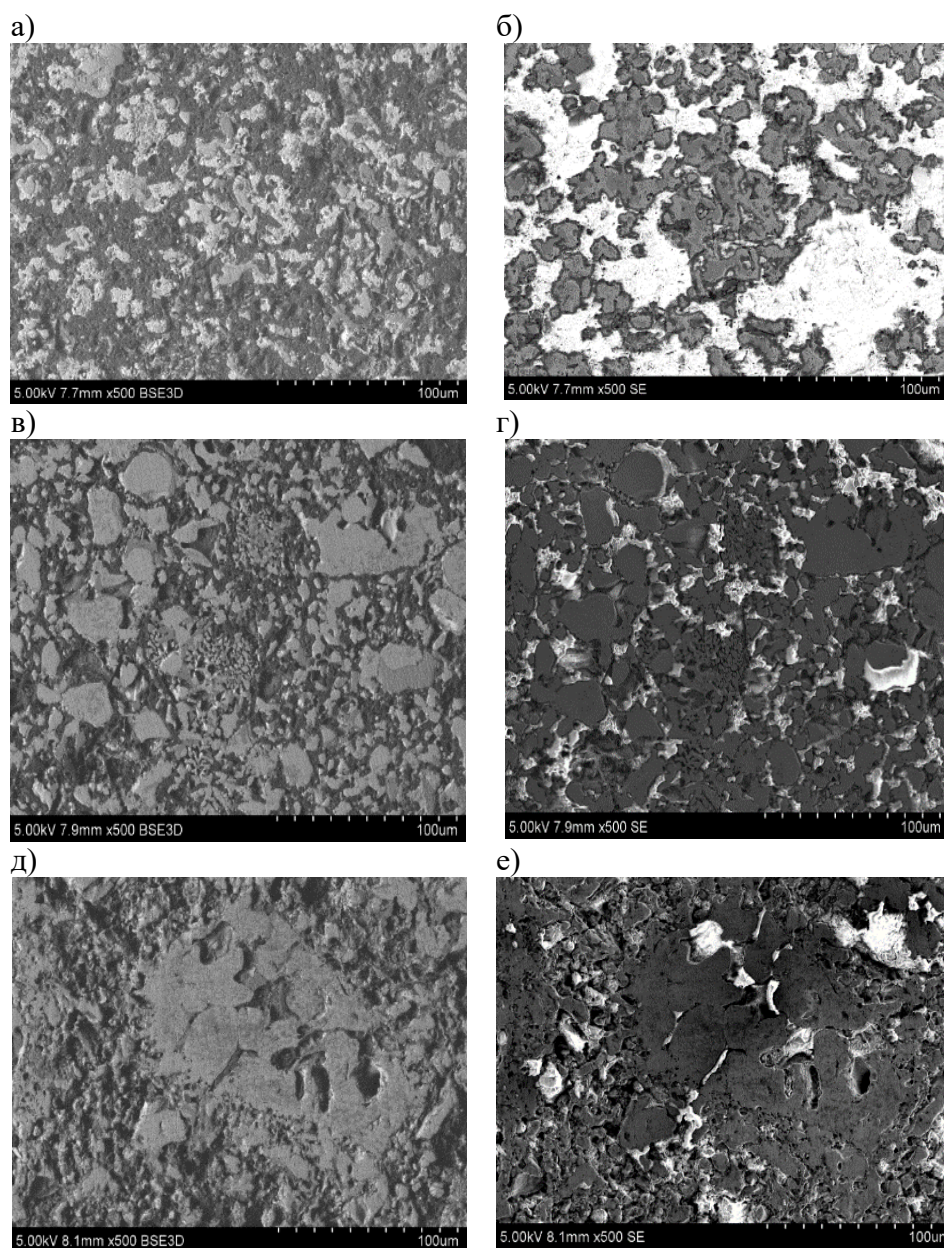


Рис. 3. Изображения характерных участков основных зон спечённого образца:
а, б – светлая зона; в, г – серая зона; д, е – чёрная зона;
а, в, д – изображения в режиме BSE; б, г, е – изображения в режиме SE

Важной особенностью серой зоны является более равномерное соотношение светлых и тёмных структурных составляющих. Именно это позволяет рассматривать её как промежуточное структурное состояние. С одной стороны, в ней сохраняются достаточно крупные плотные участки, сходные со светлой зоной. С другой стороны, возрастает доля межзёрненной матрицы и мелкодисперсной составляющей, что сближает её с чёрной зоной. В результате структура серой области выглядит наиболее переходной по своему характеру.

В целом, серая зона может быть охарактеризована как область со смешанным строением, в которой светлая и тёмная составляющие находятся в более уравновешенном соотношении. По

сравнению со светлой зоной она отличается меньшей степенью укрупнения плотных фрагментов, а по сравнению с чёрной зоной сохраняет более заметную долю светлой структурной составляющей. Это позволяет рассматривать серую зону как промежуточную область, отражающую постепенное изменение строения материала по сечению образца.

Чёрная зона отличается наиболее выраженной ролью тёмной структурной составляющей. На BSE-изображении (см. рис. 3, д) видно, что основную часть поля зрения занимает сравнительно протяжённый тёмный массив, внутри которого локально присутствуют отдельные более светлые включения и участки промежуточного контраста. По сравнению со светлой и серой зонами здесь заметно уменьшается доля развитой светлой фазы, а структура в целом выглядит более неоднородной и менее расчленённой на крупные плотные фрагменты.

На изображении в режиме SE (см. рис. 3, е) хорошо прослеживается, что чёрная зона имеет более массивный и менее дисперсный характер в пределах основного тёмного участка, однако по его периферии сохраняется сложная мелкодисперсная структура. Светлые выделения присутствуют в ограниченном количестве и локализованы неравномерно. Внутри тёмной области наблюдаются отдельные полости и участки пониженной сплошности, что придаёт ей менее выровненный вид. Это указывает на то, что в данной зоне процессы структурного преобразования протекали иначе, чем в светлой и серой областях.

Важной особенностью чёрной зоны является преобладание матричной составляющей над светлыми фрагментами. Если в светлой зоне основную роль играли сравнительно крупные плотные участки, а в серой устанавливалось более уравновешенное соотношение фаз, то здесь именно тёмная часть структуры определяет общий характер строения. Светлые включения имеют подчинённое значение и не формируют развитой непрерывной системы.

В целом чёрная зона может быть охарактеризована как область с наибольшей выраженностью тёмной матрицы и с наименьшей долей светлой структурной составляющей. По сравнению с другими зонами она отличается более высокой морфологической неоднородностью и меньшей степенью структурного выравнивания. Это позволяет рассматривать чёрную зону как наиболее глубинную и наиболее отличающуюся по строению часть образца.

Для уточнения природы выявленных структурных различий далее был выполнен локальный химический анализ отдельных зон образца и переходных участков между ними. Такой подход позволил сопоставить морфологические особенности материала с распределением основных химических элементов по его сечению и оценить степень химической неоднородности, формирующейся после спекания. Диаграмма распределения элементов по зонам образца представлена на рис. 4. Области перехода между светлой и серой, серой и чёрной зонами образца представлены на рис. 5, а, б.

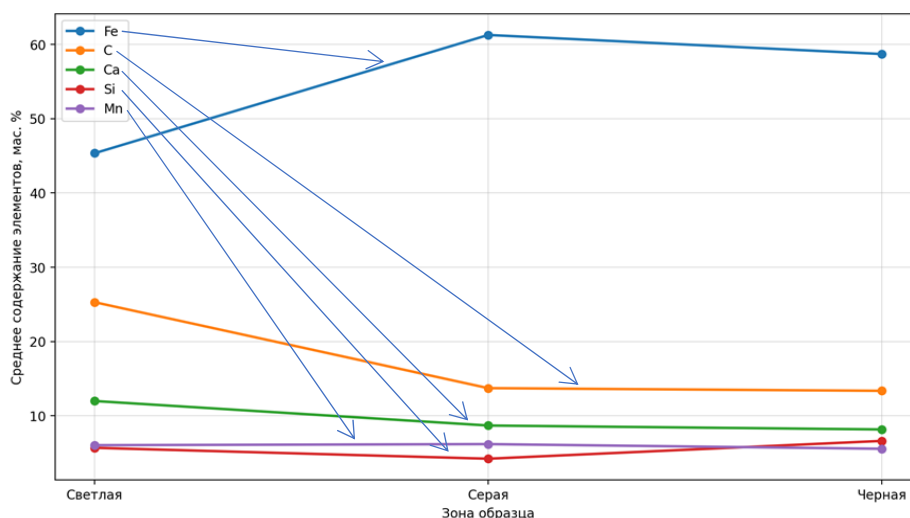


Рис. 4. Средний химический состав по зонам

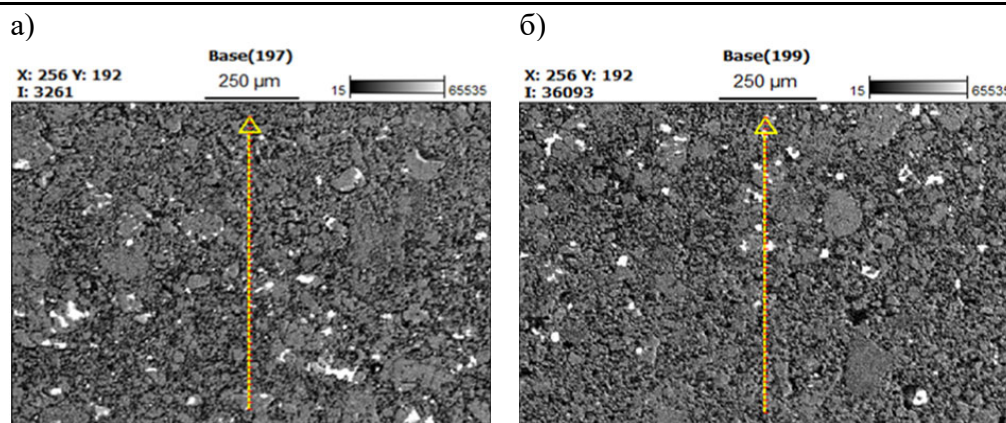


Рис. 5. Области перехода между светлой и серой (а) и серой и чёрной (б) зонами образца

По результатам усреднения результатов химического анализа установлено, что светлая, серая и чёрная зоны различаются по содержанию основных элементов. Наибольшее среднее содержание железа характерно для серой зоны, где оно достигает около 61 мас. %. Для чёрной зоны этот показатель несколько ниже и составляет около 59 мас. %, тогда как в светлой зоне среднее содержание железа уменьшается до 45 мас. %. На этом фоне светлая зона отличается наиболее высоким содержанием углерода и кальция. Среднее содержание углерода в ней достигает около 25 мас. %, а кальция – около 12 мас. %. В серой и чёрной зонах содержание углерода снижается до 13-14 мас. %, а кальция – до 8-9 мас. %.

Распределение кремния по зонам тоже чётко прослеживается. Больше всего его в чёрной зоне, в среднем около 6,6 мас. %. В светлой зоне показатель ниже: примерно 5,7 мас. %. А в серой зоне кремния ещё меньше, всего 4,2 мас. %. С марганцем картина другая: его содержание по зонам колеблется не сильно, в пределах 5,5-6,2 мас. %. Значит, марганец более-менее равномерно присутствует по всему сечению образца. Алюминий, магний и хром тоже ведут себя стабильно. Из этого следует, что минеральная составляющая сильнее всего влияет на свойства именно в глубине образца.

Итого зоны различаются не только по структуре, но и по химическому составу. В светлой зоне больше углерода и кальция, в серой железо достигает максимума, а в чёрной повышено содержание кремния. Значит, после спекания получается не однородный по составу материал, а система, в которой химия тоже меняется от зоны к зоне.

Выводы.

1. Анализ переходных участков показал, что границы между основными зонами не являются резкими. Изменение структуры происходит постепенно, что указывает на неполную гомогенизацию материала и градиентный характер его строения по сечению образца.

2. Локальный химический анализ подтвердил выраженную неоднородность состава. Установлено, что светлая зона характеризуется повышенным содержанием углерода и кальция, серая зона отличается максимальным средним содержанием железа, а чёрная зона выделяется более высоким содержанием кремния.

3. В итоге показано, что полученный материал представляет собой многофазную железосодержащую систему сложного состава, в которой структурная и химическая неоднородность формируется закономерно и охватывает весь объём образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sultana U. S., Helle S., Guévin J., et al. Influence of PbO/CuO ratio on phase composition, microstructure, melt wettability and recyclability of copper slag // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50, Iss. 13, Part A. – P. 22999-23017.
2. Heikkinen E.-P., Visuri V.-V., Fabritius T. On the heterogeneity of AOD slags in different stages of blowing // *Proceedings of the 8th European Oxygen Steelmaking Conference*. – Taranto, Italy, 2018. – P. 1-10.

3. Mei X., Zhao Q., Han C., et al. Crystallization behavior of BOF slag during the cooling process towards leaching for CO₂ sequestration // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2024. – Vol. 192. – P. 124-134.
4. Korol R., Bembenek M., Rzęsa G., Kuczaj M. Heterogeneity of glass components in slag after nickel acquisition process from Kola Peninsula (Russia) // *E3S Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 19. – P. 01016.
5. Zhang Y., Çopuroğlu O. 3-Dimensional insight into zonation within slag rims of aged blended cement // *Cement and Concrete Research*. – 2024. – Vol. 175. – P. 107371.
6. Londono-Zuluaga D., Gutiérrez R. M., Ramírez C. P., et al. Alkali-activated slag characterization by scanning electron microscopy, X-ray microanalysis and nuclear magnetic resonance spectroscopy // *Micron*. – 2020. – Vol. 138. – P. 102925.
7. German, R. M. *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles* / R. M. German. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. – 568 p.
8. Душман, С. Научные основы вакуумной техники / С. Душман; пер. с англ. – М.: Иностранная литература, 1952. – 648 с.
9. Cuevas, F. Ti–Cr–V–Fe alloys as hydrogen getters / F. Cuevas, M. Latroche // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 891. – Art. 162052. – DOI 10.1016/j.jallcom.2021.162052.
10. Бахматов, П. В. Исследование спекания прессованных заготовок из металлургического шлака в условиях автовакуума, формируемого геттерной средой / П. В. Бахматов, Е. А. Старцев // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2025. – № V (85). – С. 79-84.
11. Лиманкин, В. В. Направления переработки техногенных отходов дальневосточных металлургических предприятий / В. В. Лиманкин, Е. А. Старцев, В. В. Бельский // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2024. – № III (75). – С. 119-122.
12. Бахматов, П. В. Влияние режимов дуговой сварки под слоем экспериментального флюса на распределение внутренних напряжений в сварных образцах, выявленных методом магнитной памяти металлов / П. В. Бахматов, Е. А. Старцев // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2023. – № V (69). – С. 83-96.
13. Влияние титана на структурообразование и микротвёрдость высокоэнтропийного сплава системы Al–Co–Cr–Fe–V–M (M=Ti), синтезированного СВС-металлургией / И. О. Паньшин, Э. Х. Ри, Е. Д. Ким, В. С. Попова // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2025. – № I (81). – С. 74-79.
14. Получение лигатуры на основе шеелитового концентрата методом алюминотермии / В. В. Гостищев, Э. Х. Ри, Е. Д. Ким [и др.] // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2017. – № III-1 (31). – С. 84-91.

REFERENCES

1. Sultana U. S., Helle S., Guévin J., et al. Influence of PbO/CuO ratio on phase composition, microstructure, melt wettability and recyclability of copper slag // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50, Iss. 13, Part A. – P. 22999-23017.
2. Heikkinen E.-P., Visuri V.-V., Fabritius T. On the heterogeneity of AOD slags in different stages of blowing // *Proceedings of the 8th European Oxygen Steelmaking Conference*. – Taranto, Italy, 2018. – P. 1-10.
3. Mei X., Zhao Q., Han C., et al. Crystallization behavior of BOF slag during the cooling process towards leaching for CO₂ sequestration // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2024. – Vol. 192. – P. 124-134.
4. Korol R., Bembenek M., Rzęsa G., Kuczaj M. Heterogeneity of glass components in slag after nickel acquisition process from Kola Peninsula (Russia) // *E3S Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 19. – P. 01016.
5. Zhang Y., Çopuroğlu O. 3-Dimensional insight into zonation within slag rims of aged blended cement // *Cement and Concrete Research*. – 2024. – Vol. 175. – P. 107371.
6. Londono-Zuluaga D., Gutiérrez R. M., Ramírez C. P., et al. Alkali-activated slag characterization by scanning electron microscopy, X-ray microanalysis and nuclear magnetic resonance spectroscopy // *Micron*. – 2020. – Vol. 138. – P. 102925.
7. German, R. M. *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles* / R. M. German. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. – 568 p.
8. Dushman, S. *Scientific Foundations of Vacuum Technique* / S. Dushman ; trans. from English. – Moscow : Foreign Literature, 1952. – 648 p. (Original: Dushman, S. *Scientific foundations of vacuum technique* / S. Dushman. – New York : John Wiley & Sons, 1949. – 806 p.)
9. Cuevas, F. Ti–Cr–V–Fe alloys as hydrogen getters / F. Cuevas, M. Latroche // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 891. – Art. 162052. – DOI 10.1016/j.jallcom.2021.162052.



10. Bakhmatov, P. V. Investigation of sintering of pressed billets from metallurgical slag in an autovacuum formed by a getter medium / P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev // Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2025. – No. 5(85). – P. 79-84. – EDN TGRECM.
11. Limankin, V. V., Startsev, E. A., Belsky, V. V. Directions for processing technogenic waste from Far Eastern metallurgical enterprises / V. V. Limankin, E. A. Startsev, V. V. Belsky // Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2024. – No. 3(75). – P. 119-122. – EDN IZQVYO.
12. Bakhmatov, P. V., Startsev, E. A. Influence of arc welding modes under a layer of experimental flux on the distribution of internal stresses in welded samples revealed by magnetic metal memory method / P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev // Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2023. – No. 5(69). – P. 83-96. – DOI 10.17084/20764359-2023-69-83. – EDN EMSNZT.
13. Panshin, I. O., Ri, E. Kh., Kim, E. D., Popova, V. S. Effect of titanium on the structure formation and microhardness of high-entropy alloy of the Al-Co-Cr-Fe-V-M (M=Ti) system synthesized by SHS metallurgy / I. O. Panshin, E. Kh. Ri, E. D. Kim, V. S. Popova // Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2025. – No. 1(81). – P. 74-79. – EDN CSHTTV.
14. Gostishchev, V. V., Ri, E. Kh., Kim, E. D., et al. Obtaining the alloy based on the scheelite concentrate by the aluminothermal method / V. V. Gostishchev, E. Kh. Ri, E. D. Kim [et al.] // Scholarly Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2017. – Vol. 1, No. 3(31). – P. 84-91. – EDN ZIBJND.

Content

ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

S. I. Makasheva, P. S. Pinchukov

ASSESSMENT OF POWER QUALITY BASED ON HIGHER
HARMONIC CURRENT COMPONENTS IN A 220 KV TRANSIT SECTION 4

D. S. Fokin, A. V. Gulyaev, E. E. Ten

ASSESSING THE SUFFICIENCY OF SOURCE DATA
FOR ESTABLISHING TECHNICAL CAUSALITY IN FORENSIC
ELECTRICAL ENGINEERING EXAMINATION 15

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

S. P. Cherny, N. S. Shusharin

SIMULATION OF AN UNSTEADY ENVIRONMENT AND DYNAMICS
OF AN UNDERWATER VEHICLE FOR A DYNAMIC POSITIONING SYSTEM 25

V. D. Voroshchenko, A. A. Bitkina, E. P. Ivankova

AUTOMATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS
OF AIRCRAFT IN-PLANT TRANSPORTATION 34

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

K. K. Kim, I. M. Karpova, V. A. Smirnov, S. N. Ivanov

MODELLING OF COOLING PROCESSES OF SOLAR PANELS
LOCATED ON WIND HELIOGENERATOR BLADES 44

A. I. Evstigneev, Yu. B. Koloshenko, P. V. Bakhmatov

CONVERGENCE OF NUMERICAL SOLUTION FOR THE PROBLEM
OF THE EFFECT OF ANNULAR TECHNOLOGICAL GROOVES
ON THE STRESS-STRAIN STATE OF SPHERICAL METAL CASTING MOLDS..... 54

S. D. Khasanshin, A. L. Grigorieva, V. R. Lazutina

NUMERICAL ANALYSIS OF AERODYNAMIC WIND PROFILE
AND SHEAR GRADIENT FOR VARIOUS TYPES
OF UNDERLYING SURFACE IN THE SOFTWARE PACKAGE 59

S. I. Noskov, S. P. Seredkin

APPLICATION OF EXPERT INFORMATION IN THE CONSTRUCTION
OF A PIECEWISE-LINEAR CONVOLUTION OF PARTIAL PERFORMANCE
INDICATORS WITH A LINEAR COMPONENT 66

G. V. Grenkin, K. N. Galimzyanova

RECOVERY OF HEAT SOURCES FROM TEMPERATURE
MEASUREMENTS WITHIN THE FRAMEWORK
OF A COMPLEX HEAT TRANSFER MODEL 74

I. A. Treshchev, A. I. Malakhovets, E. I. Monastyrnaya

ON APPROACH TO BUILDING AN EVENT-DRIVEN MODEL
OF MALICIOUS ATTACK SCENARIOS 81

K. D. Khryapenko, A. L. Grigorieva, A. S. Bolotsky

INTEGRATION OF PHYSICALLY INFORMED NEURAL
NETWORKS INTO A RIGID-PLASTIC CRACKING MODEL
WITH DISCONTINUOUS VELOCITY FIELDS 91

MACHINERY

O. E. Sysoev, E. O. Sysoev

PREDICTION OF WEAR OF INDEXABLE END MILLS
WHEN MACHINING PARTS MADE
OF HIGH-STRENGTH MATERIALS 99

B. Ya. Mokritskii

ON COATING APPLICATION ON MILLING CUTTERS
FOR ALUMINUM ALLOY COMPLEX PROCESSING 105

E. R. Vaniev, V. V. Skakun, E. Sh. Dzhemilov, R. M. Dzhemalyadinov, A. I. Aliev, T. I. Bashkova

THE INFLUENCE OF RUNNING-IN ON THE DURABILITY
OF DISC CUTTERS AND THE ROUGHNESS
OF THE MACHINED SURFACE UNDER CONDITIONS
OF USING ENVIRONMENTALLY FRIENDLY LUBRICANTS 109

MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGY

E. A. Startsev, P. V. Bakhmatov

FEATURES OF THE STRUCTURE AND COMPOSITION
OF AN IRON-CONTAINING MATERIAL BASED ON METALLURGICAL
SLAG OBTAINED UNDER AUTOVACUUM CONDITIONS 120

Научное издание

Учёные записки КНАГТУ
2026 № V (93)
Науки о природе
и технике

Выпускающий редактор
Е. П. Иванкова

Подписано в печать 25.09.2026
Дата выхода в свет 30.09.2026

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 14,88.
Уч.-изд. л. 13,65.
Тираж 200. Заказ 31493

Отпечатано:
в типографии КНАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27.

