МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО РАН НА ТЕРРИТОРИИ ДНР

ISSN 2664-7362 (PRINT)
ISSN 2664-7370 (ONLINE)

МАТЕРИАЛЫ
XI Международной научной конференции

Донецкие чтения – 2026:
образование, наука, инновации, культура и вызовы современности



Том 2 | **Физические, технические и компьютерные науки. Часть 1**

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий государственный университет»

Представительство федерального государственного
бюджетного учреждения «Российская академия наук»
на территории Донецкой Народной Республики

XI Международная научная конференция

Материалы конференции

Донецкие чтения – 2026:

образование, наука, инновации, культура и вызовы современности

Том 2

ФИЗИЧЕСКИЕ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

Часть 1

г. Донецк
10–12 ноября 2026 г.

Донецк
Издательство ДонГУ
2026

ББК В3я431+397я431
УДК 53+62+004(043.2)
Д672

Редакционная коллегия:

С.В. Беспалова (гл. ред.), А.В. Белый (зам. гл. ред.),
М.В. Фоменко, С.А. Фоменко, И.А. Третьяков (отв. секр. секции),
В.К. Толстых, А.Г. Петренко, Е.Д. Пометун.

Д672 **Донецкие чтения – 2026: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности:** Материалы XI Международной научной конференции (Донецк, 10–12 ноября 2026 г.). – *Том 2: Физические, технические и компьютерные науки. Часть 1* / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2026. – 303 с.

Ответственность за содержание материалов, аутентичность цитат, правильность фактов и ссылок несут авторы.

Во второй том материалов XI Международной научной конференции «Донецкие чтения – 2026: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» вошли исследования по актуальным проблемам физических, технических и компьютерных наук. Рассматриваются вопросы физической гидроаэродинамики, метрологии, техносферной безопасности, теоретической и экспериментальной физики, радиофизики, инфокоммуникационных технологий, информационной безопасности, компьютерных систем и технологий искусственного интеллекта.

Освещенные в сборнике проблемы и направления их решения будут полезны научным работникам, преподавателям, студентам, аспирантам и докторантам, проводящим исследования в области физических, технических и компьютерных наук.

ББК В3я431++397я431
УДК 53+62+004(043.2)

© Коллектив авторов, 2026
© Донецкий государственный университет, 2026

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Панченко Владислав Яковлевич, вице-президент Российской академии наук, д-р физ.-мат. наук, профессор, академик РАН (г. Москва).

Сопредседатель:

Беспалова Светлана Владимировна, ректор Донецкого государственного университета, руководитель Представительства Российской академии наук на территории Донецкой Народной Республики, д-р физ.-мат. наук, профессор (г. Донецк).

Члены программного комитета:

Алексеев Игорь Александрович, ведущий научный сотрудник лаборатории физической географии и биогеографии Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, д-р геогр. наук (г. Иркутск).

Андреев Дмитрий Александрович, заместитель декана по научной работе исторического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (г. Москва), д-р ист. наук, доцент (г. Москва).

Аноприенко Александр Яковлевич, ректор Донецкого национального технического университета, канд. техн. наук, профессор (г. Донецк).

Бабурин Сергей Николаевич, президент Ассоциации юридических вузов, научный руководитель Центра интеграционных и цивилизационных исследований Института государства и права РАН, д-р юрид. наук, профессор, почётный профессор Донецкого государственного университета (г. Москва).

Бахтин Станислав Геннадиевич, декан химического факультета Донецкого государственного университета, канд. хим. наук, доцент (г. Донецк).

Белозеров Геннадий Александрович, заместитель генерального директора Автономной некоммерческой организации «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов».

Белый Александр Владимирович, проректор по научной и инновационной деятельности Донецкого государственного университета, канд. хим. наук, доцент (г. Донецк).

Блинова Елена Евгеньевна, заведующая кафедрой прикладной психологии и развития личности Херсонского государственного педагогического университета, д-р психол. наук, профессор (г. Херсон).

Вартанова Елена Леонидовна, декан факультета журналистики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д-р филол. наук, академик РАО (г. Москва).

Варюхин Виктор Николаевич, научный руководитель Донецкого физико-технического института им. А. А. Галкина, д-р физ. мат. наук, профессор, член-корр. РАН, (г. Донецк).

Воронова Ольга Евгеньевна, профессор кафедры литературы и журналистики, руководитель Центра региональных проектов и межрегиональных связей Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина, д-р филол. наук, профессор (г. Рязань).

Ганиева Ирина Александровна, директор АНО «Научно образовательный центр „Кузбасс“», д-р экон. наук, доцент (г. Кемерово).

Глухов Александр Захарович, главный научный сотрудник Донецкого ботанического сада, профессор кафедры ботаники и экологии Донецкого государственного университета, д-р биол. наук, профессор (г. Донецк).

Головчан Алексей Витальевич, директор Донецкого физико-технического института им. А. А. Галкина, канд. физ. мат. наук, доцент (г. Донецк).

Данилюк Даниил Анатольевич, и. о. директора Института прикладной математики и механики, канд. физ. мат. наук (г. Донецк).

Журавлёва Екатерина Васильевна, Советник президента РАН, советник Председателя Совета директоров ГК «ЭФКО», д-р с.-х. наук, профессор РАН (г. Белгород).

Зенченко Светлана Вячеславовна, проректор по научной работе Северо-Кавказского федерального университета, д-р экон. наук, профессор (г. Ставрополь).

Зинченко Юрий Петрович, декан факультета психологии Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д-р психол. наук, профессор, член-корреспондент РАН, академик РАО (г. Москва).

Игнатенко Григорий Анатольевич, ректор Донецкого государственного медицинского университета им. М. Горького, д-р мед. наук, профессор, академик РАН (г. Донецк).

Ильинский Владимир Викторович, и. о. зав. кафедрой общей экологии и гидробиологии Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д-р биол. наук, профессор (г. Москва).

Исаков Владимир Борисович, профессор НИУ «Высшая школа экономики», д-р юрид. наук, профессор (г. Москва).

Калмыков Степан Николаевич, вице-президент Российской академии наук, д-р хим. наук, профессор, академик РАН (г. Москва).

Керимов Александр Джангирович, главный научный сотрудник Института государства и права Российской академии наук, д-р юрид. наук, профессор (г. Москва).

Кирпичников Михаил Петрович, декан биологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д-р биол. наук, профессор, академик РАН (г. Москва).

Кожухов Игорь Борисович, профессор кафедры высшей математики НИУ «Московский институт электронной техники», д-р физ. мат. наук, профессор (г. Москва).

Крамаренко Артём Александрович, заместитель Председателя Правительства Донецкой Народной Республики, Министр сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности (г. Донецк).

Красильников Павел Владимирович, декан факультета почвоведения Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д-р биол. наук, член-корреспондент РАН (г. Москва).

Липгарт Андрей Александрович, декан филологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д-р филол. наук, профессор (г. Москва).

Лубков Алексей Владимирович, ректор Московского педагогического государственного университета, д-р ист. наук, профессор, академик РАО (г. Москва).

Макаров Кирилл Борисович, заместитель Председателя Правительства Донецкой Народной Республики (г. Донецк).

Матишов Геннадий Григорьевич, заместитель президента РАН, научный руководитель Южного научного центра РАН, д-р геогр.наук, профессор, академик РАН (г. Ростов-на-Дону).

Месхи Бесарион Чохоевич, ректор Донского государственного технического университета, председатель Совета ректоров вузов Ростовской области, д-р техн. наук, профессор, академик РАО (г. Ростов на Дону).

Минаев Андрей Иванович, профессор Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина, д-р ист. наук, доцент (г. Рязань).

Некипелов Александр Дмитриевич, директор Московской школы экономики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д-р экон. наук, профессор, академик РАН (г. Москва).

Нечаев Владимир Дмитриевич, ректор Севастопольского государственного университета, д-р полит. наук, доцент (г. Севастополь).

Овечко Сергей Викторович, заместитель Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, канд. биол. наук (г. Севастополь).

Пармон Валентин Николаевич, научный руководитель Института катализа СО РАН, д-р хим. наук, академик РАН (г. Новосибирск).

Плугатарь Юрий Владимирович, директор Ордена Трудового Красного Знамени Никитского ботанического сада – Национального научного центра РАН, председатель Совета ботанических садов России, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН (г. Ялта).

Половян Алексей Владимирович, директор Института экономических исследований, д-р экон. наук, доцент, (г. Донецк).

Понедельников Алексей Борисович, руководитель отдела «Северо-Азовский» Южного филиала ФГБНУ «ВНИРО» (г. Мариуполь).

Приходько Светлана Анатольевна, директор Донецкого ботанического сада, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. (г. Донецк).

Прутцков Григорий Владимирович, профессор Института медиа НИУ «Высшая школа экономики», д-р филол. наук (г. Москва).

Рябичев Виктор Дронович, ректор Луганского государственного университета имени Владимира Даля, д-р техн. наук, профессор (г. Луганск).

Садовничий Виктор Антонович, ректор Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д-р физ.-мат. наук, профессор, академик РАН (г. Москва).

Секиринский Дмитрий Сергеевич, заместитель Министра науки и высшего образования Российской Федерации.

Скуратовская Екатерина Николаевна, врио директора Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, канд. биол. наук (г. Севастополь).

Сократов Сергей Альфредович, зам. декана географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, канд. геогр. наук, доцент (г. Москва).

Тедеев Вадим Ботазович, ректор Юго Осетинского государственного университета имени А. А. Тибилова, канд. техн. наук, профессор (г. Цхинвал).

Тохтарь Валерий Константинович, директор Ботанического сада Белгородского государственного национального исследовательского университета, д-р биол. наук, с. н. с. (г. Белгород).

Трофимов Олег Владимирович, Министр образования и науки Донецкой Народной Республики (г. Донецк).

Тулупов Владимир Васильевич, декан факультета журналистики Воронежского государственного университета, д-р филол. наук, профессор (г. Воронеж).

Туранина Неонила Альфредовна, зав. кафедрой библиотечно-информационной деятельности Белгородского государственного института искусств и культуры, д-р филол. наук, профессор (г. Белгород).

Федянин Андрей Анатольевич, проректор – начальник управления научной политики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, д-р физ. мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН (г. Москва).

Харламенкова Наталья Евгеньевна, заведующая лабораторией психологии развития субъекта в нормальных и посттравматических состояниях, заместитель директора Института психологии РАН, д-р психол. наук, профессор (г. Москва).

Хомутова Екатерина Валерьевна, директор Института физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко, канд. биол. наук (г. Донецк).

Шебалков Алексей Викторович, Министр природных ресурсов и экологии Донецкой Народной Республики (г. Донецк).

ФИЗИЧЕСКИЕ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

Физическая гидроаэродинамика, метрология, техносферная безопасность

УДК 621.31

ВЛИЯНИЕ ДОПУСКОВ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОННОГО РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

Ахметова Я.Т., ORCID 0009-0001-6589-8160,
Аскарова А.Я., доц., канд. техн. наук, ORCID 0009-0007-7379-3127
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
Yazgul_achmetova@mail.ru

Электронное реле времени (ЭРВ) – устройство, предназначенное для включения исполнительного механизма с определённой задержкой относительно других устройств либо на заданный промежуток времени [1]. Область применения таких реле весьма широка: они востребованы всюду, где необходимо соблюдать временные интервалы между включением и выключением оборудования или поддерживать алгоритм работы, построенный на временных задержках.

Особую значимость точность временных задержек приобретает в системах автоматизации, где реле времени выступают элементом управления технологическими процессами. Они обеспечивают согласованную работу исполнительных механизмов, выдерживая интервалы между операциями, позволяя синхронизировать циклы оборудования, предотвращать ложные срабатывания и аварийные ситуации. Следовательно, качество сборки ЭРВ – фактор надёжности и безопасности функционирования автоматизированных систем.

К электронным компонентам, лежащих в основе и определяющим работу ЭРВ, относятся: сопротивление резисторов, ёмкость конденсаторов, напряжение источника питания, коэффициент усиления транзистора, ток отпускания электромагнитного реле. Точность подбора указанных номиналов задаёт стабильность и повторяемость временных интервалов.

Время срабатывания реле при номинальных значениях входных параметров описывается функцией:

$$T = f(R, C, U_n, \beta, I_{omn}), \quad (1)$$

где T – время срабатывания реле времени при номинальных значениях входных параметров; R – сопротивление; C – ёмкость конденсатора; U_n – напряжение источника питания; β – коэффициент усиления транзистора; $I_{отп}$ – ток отпускания реле.

Отклонение сопротивления резистора или ёмкости конденсатора влечёт изменение длительности выдержки времени. Этот факт необходимо учитывать уже на стадии проектирования, так как даже незначительные отклонения способны вызвать заметные изменения временного интервала. В энергосистемах подобное отклонение может обернуться ложным либо запоздалым срабатыванием защиты. К примеру, в каскадных схемах защиты линий электропередачи несоблюдение уставки по времени одним реле нарушает всю логику селективной работы, что приводит к отключению более широкого участка сети и развитию системной аварии.

Таким образом, номинальные значения электронных компонентов выступают первым фактором влияния точности сборки на качество прибора.

При учете разброса входных параметров R, C, U, β, $I_{отп}$ изменение выходного параметра записывается в виде:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial R}\Delta R + \frac{\partial T}{\partial C}\Delta C + \frac{\partial T}{\partial U}\Delta U + \frac{\partial T}{\partial \beta}\Delta\beta + \frac{\partial T}{\partial I_{отп}}\Delta I_{отп}, \qquad (2)$$

где ΔT – суммарная погрешность выходных параметров; ΔR, ΔC, ΔU, $\Delta\beta$, $\Delta I_{отп}$ – погрешности входных данных.

Слагаемые уравнения (2) отражают степень влияния поля допуска каждого входного параметра на величину поля допуска выходного параметра. Чем больше частная производная, тем жёстче требования к допуску на данный компонент.

Анализ уравнения (2) позволяет решить две метрологические задачи:

1. Прямая задача – при заданных допусках на входные параметры определить результирующее поле рассеяния выходного параметра ΔT и проверить его соответствие норме точности.

2. Обратная задача – при заданном поле допуска на выходной параметр $[T_{min}; T_{max}]$ обоснованно назначить допуски на входные параметры, обеспечив требуемую точность при минимальной стоимости.

Если при заданных отклонениях входных параметров выходной параметр укладывается в заданное поле допуска, речь идёт о полной взаимозаменяемости сборки [2]. Она обеспечивает точность сборки за счёт простой технологии, облегчает кооперирование, не требует высокой квалификации рабочих, легко автоматизируется и нормируется. Однако к деталям и узлам предъявляются повышенные точностные требования, что заметно увеличивает стоимость прибора.

Альтернативой служит неполная взаимозаменяемость, при которой допуски на компоненты назначаются расширенными, а требуемая точность выходного параметра достигается за счёт группового подбора, регулировки или применения компенсаторов. В метрологическом смысле

это означает переход от расчёта по методу максимума-минимума к вероятностному методу, учитывающему законы распределения погрешностей входных параметров.

Второй фактор – технология пайки: от качества соединений зависят надёжность и долговечность изделия. Применяют пайку оплавлением в печах с заданным термопрофилем, обеспечивающую равномерный прогрев и устраняющую дефекты ручной пайки; качество контролируют оптическими системами инспекции.

Третий фактор – рациональное размещение компонентов на плате, снижающее помехи и наводки. При проектировании печатной платы учитывают паразитные параметры – индуктивность проводников и ёмкость между дорожками; компоненты, задающие временные интервалы (RC-цепи, кварцевые резонаторы), размещают вплотную к микросхеме таймера и экранируют.

Четвёртый фактор – естественное старение компонентов под действием температуры и износа.

Таким образом, на функционирование и характеристики ЭРВ влияет его точность сборки.

Большинство промышленных реле времени не являются средствами измерений в понимании ФЗ-102 и подлежат калибровке согласно требованиям производителя, а поверка обязательна лишь в сфере государственного регулирования. Поверка регламентируется Федеральным законом №102-ФЗ и Приказом Минпромторга РФ №2510; методики поверки разрабатываются по ГОСТ Р 8.973-2019.

Калибровка включает диагностику, определение характеристик, корректировку и верификацию [3]. Применяют частотомер-хронометр с погрешностью не более 0,01 %, стабилизированный источник питания, мультиметр класса 0,5 и нагрузочные устройства [3].

В процессе эксплуатации дрейф параметров ЭРВ неизбежен. Для ответственных применений устанавливаются межповерочные (МПИ) интервалы, длительность которых определяется на основе испытаний на долговременную стабильность. Для увеличения МПИ применяют компоненты с низким коэффициентом старения – плёночные резисторы и керамические конденсаторы типа NP0. Реле обычно не ремонтируют, а заменяют, поэтому важны точность сборки и калибровка каждые 2–3 года.

Список литературы

1. Беленцов, С. Е. Основные понятия о реле времени / С. Е. Беленцов, А. И. Будников // Юность и Знания – Гарантия Успеха – 2024: сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции: в 3 т., Курск, 19–20 сентября 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 247-249. – EDN OKXJUH.
2. Мочалов, В. Д. Метрология, стандартизация и сертификация. Взаимозаменяемость и технические измерения: учеб. пособие / В. Д. Мочалов, А. А. Погонин,

А. Г. Схиртладзе. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 264 с. – URL: https://elibss.kai.ru/e-library/Полнотексты/Содержание/829038.pdf (дата обращения: 02.10.2026).
3. Калибровка реле времени: настройка точности и замена на электронные [Электронный ресурс] // Inner. – URL: https://inner.su/articles/rele-vremeni-vret-kalibruem-tochnost/ (дата обращения: 05.09.2026).

УДК 504.064.4

ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАННЫХ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И МИРОВОЙ ОПЫТ

Белецкий Я.О., ORCID 0009-0001-9010-369, ***Беляев Н.В.***
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ, г. Макеевка, РФ
ya.o.beletskiy@donnasa.ru

Введение. Свинцово-кислотные аккумуляторы широко применяются в автомобильном транспорте, системах резервного электроснабжения, промышленном оборудовании и энергетических установках. После окончания срока службы они становятся источником вторичного свинца, однако одновременно относятся к отходам, представляющим экологическую опасность. Основная опасность связана с наличием свинца и его соединений, серной кислоты, а также других компонентов аккумулятора. При нарушении условий сбора, хранения и переработки возможны загрязнение почвы и воды соединениями свинца и образование токсичных выбросов [1].

Переработка отработанных аккумуляторов позволяет одновременно уменьшить количество опасных отходов и сократить потребность в первичном сырье. Современные технологии включают механическое разделение, пирометаллургические, гидрометаллургические и электрохимические процессы [2].

Основная часть. Конструктивно свинцово-кислотный аккумулятор состоит из полимерного корпуса, свинцовых решёток, электродной пасты, сепараторов и электролита. При промышленной переработке первым этапом является безопасный сбор и транспортирование аккумуляторов с исключением утечек электролита. После этого аккумуляторы подвергаются дроблению и разделению основных компонентов.

Типовая последовательность переработки может быть представлена следующим образом:

отработанные аккумуляторы → дробление → гидросепарация → разделение полимеров и металлической фракции → обработка

свинецсодержащей пасты → получение вторичного свинца → рафинирование → очистка отходящих газов.

Наиболее распространённым промышленным направлением остаётся пирометаллургическая переработка. Свинецсодержащие материалы после подготовки поступают в плавильные агрегаты, где при повышенной температуре восстанавливаются соединения свинца и образуется черновой свинец. Далее металл подвергается рафинированию. Преимуществами метода являются высокая производительность и возможность переработки больших объёмов сырья. К недостаткам относятся значительные энергозатраты, образование шлаков и необходимость эффективной очистки газов от пыли, сернистых соединений и аэрозолей свинца [2, 3].

Гидрометаллургические методы позволяют проводить основные стадии переработки при более низких температурах. Свинецсодержащая паста предварительно переводится в растворимую форму, после чего раствор очищается от примесей и из него выделяется свинец. В качестве последней стадии может применяться электровыделение металла. Такие процессы позволяют уменьшить или полностью исключить стадию плавки, однако требуют регенерации реагентов и эффективного удаления примесей из растворов.

Особое направление представляет электрохимическая переработка. В данном случае свинецсодержащий материал растворяется на аноде, а металлический свинец осаждается на катоде. Процесс может осуществляться при сравнительно низких температурах и позволяет непосредственно управлять скоростью растворения и осаждения металла. Перспективность электрохимического направления связана с возможностью сокращения высокотемпературных стадий и получения металла высокой чистоты.

Развитие системы переработки имеет существенные различия в разных странах.

Таблица

Особенности переработки отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов

Страна	**Основное направление**	**Характерные особенности**
Китай	Пирометаллургия и гидрометаллургия	Развитие промышленной переработки, усиление контроля сбора и предприятий
США	Пирометаллургическая переработка	Развитая система возврата аккумуляторов и промышленного получения вторичного свинца
Япония	Замкнутый цикл переработки	Высокая организованность сбора и тесная связь производителей с переработчиками
Индия	Пирометаллургия и переработка вторичного свинца	Одновременно развиваются формальный и неформальный сегменты переработки
Россия	Пирометаллургическая переработка	Основное внимание уделяется сбору, транспортированию и переработке опасных отходов

Для Китая важной задачей является повышение эффективности организованного сбора аккумуляторов и снижение доли неформальной переработки. Исследования показывают, что совершенствование системы управления отходами способно существенно повысить циркуляцию свинца в промышленном цикле [3]. В США переработка свинцово-кислотных аккумуляторов является давно сформированной отраслью, основанной на возврате отработанных батарей в систему промышленной переработки. В Японии значительное внимание уделяется замкнутому циклу обращения продукции и ответственности производителей. Для Индии актуальной проблемой остаётся переход от неформальной переработки к контролируемой промышленной системе.

В России обращение с отработанными аккумуляторами регулируется законодательством об отходах производства и потребления. Основным нормативным документом является Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [4]. При организации переработки необходимо обеспечивать безопасное обращение с аккумуляторами на всех стадиях – от накопления и транспортирования до переработки и обезвреживания образующихся отходов.

С экологической точки зрения наиболее важными направлениями совершенствования предприятий являются герметизация оборудования, автоматизация загрузки сырья, эффективная очистка отходящих газов, повторное использование технологической воды и снижение образования шлаков. Перспективным является переход к комбинированным схемам, в которых механическая подготовка сочетается с гидрометаллургическими или электрохимическими стадиями.

Заключение. Переработка отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов является одновременно природоохранной и ресурсосберегающей задачей. Основной промышленный способ получения вторичного свинца связан с пирометаллургией, однако его применение требует значительных энергозатрат и эффективной системы газоочистки. Гидрометаллургические и электрохимические методы позволяют проводить переработку при более низких температурах и являются перспективными направлениями развития отрасли.

Список литературы

1. Герасимов, В. С. Методы утилизации свинцово-кислотных аккумуляторных батарей / В. С. Герасимов, Р. Ю. Соловьев, А. О. Капезров // Панорама. – 2017. – Текст: электронный URL: https://panor.ru/articles/metody-utilizatsii-svintsovo-kislotnykh-akkumulyatornykh-batarey/43133.html (дата обращения: 04.10.2026).
2. Ялалова, М. М. Перспективы переработки утильных свинцово – кислотных аккумуляторов / М. М. Ялалова, А. И. Сердюк // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 72-82. – EDN NHEHRW.
3. Бессер, А. Д. Анализ современного состояния переработки использованных свинцово-кислотных батарей / А. Д. Бессер, В. С. Сорокина, А. А. Погосян //

Цветные металлы. – 2006. – № 2. — Текст: электронный URL: https://www.rudmet.ru/journal/969/article/15224/ (дата обращения: 04.10.2026).
4. ИТС 15-2021. Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов). – Текст: электронный // Бюро техники. – 2021. – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/zaklyuchenie/0/its_15-2021_informatsionno-tekhnicheskiy_spravochnik_po.html (дата обращения: 04.10.2026).

УДК 622.8

ПЕТРУРГИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРЕЛЫХ ПОРОД ОТВАЛОВ ШАХТ КУЗБАССА

Брызгалов М.А.
Компания «ООО Проминновации», г. Кемерово, РФ

В российской угольной промышленности из более чем 2 миллиардов тонн добываемой горной массы на уголь приходится порядка 20 %, оставшаяся масса уходит в отвалы, степень утилизации которых не превышает 4 %. Поэтому весьма перспективным является возможность вовлечения в производственный оборот огромной массы техногенных отходов отвалов вскрышных пород. Использованием этих отходов можно пополнить сырьевую базу нерудных технологичных материалов.

Проведены исследования с целью использования горелых пород отвалов шахт для производства современных материалов. Развитие современных инновационных технологий производства материалов предопределяет использование в качестве дополнительных источников сырья техногенных отходов. Это обусловлено, с одной стороны, истощением запасов природного сырья, с другой – интенсивным накоплением промышленных отходов [3].

Переработка горелых пород шахтных выработок имеет определенные сложности, из-за тугоплавкости этих пород и высокого брака изделий за счет непостоянства химического состава [1]. Кроме того, горелые породы являются высоко кислотными [2].

Разработаны методы модифицирования химического и минерального состава горелых пород отвалов шахт для производства современных материалов. При добавлении подшихтовочного материала, получается продукция довольно высокого качества (огнеупорность горелых пород шахтных отвалов находится в пределах от 1250 до 1400°С). Получены образцы каменной керамики, защитных антикоррозионных покрытий.

Созданы физико-химические основы для комплексной переработки горелых пород отвалов шахт, имеющих высокую кислотность.

Список литературы

1. Липовский, И. Е. Исследование некоторых механических и теплофизических свойств каменного литья в зависимости от строения и температуры: Автореферат канд. техн. наук / И. Е. Липовский. – Киев, 1966. – 17 с.
2. Липовский, И. Е. Основы петругии / И. Е. Липовский, В. А. Дорофеев. – М.: Металлургия, 1972. – С. 320.
3. Сибилев, А. И. Производство и применение изделий из каменного литья / А. И. Сибилев, И. Е. Липовский, В. А. Дорофеев, Н. А. Бухавцев. – Сталино: Кн. изд-во, 1960. – 83 с. 8. Магматические горные породы / Под ред. Богатикова О.А. Ч. I и II. – М.: Наука, 1983. – С. 767.

УДК 614.841:532.517

РАСЧЕТ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ С ДОБАВКАМИ ПОЛИМЕРОВ

Быковская Н.В., канд. техн. наук, доц.,
Асланов П.В., канд. физ.-мат. наук, с. н. с., ***Собко А.Ю.***
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
nataliya_bykovskaya@mail.ru, aslanov.fnpme@gmail.com, o.sobko@donnu.ru

Актуальность. Для расчета гидродинамического сопротивления турбулентных течений с полимерными добавками, применяемых для повышения эффективности работы систем водяного пожаротушения и аварийной откачки воды во всей области изменения чисел Рейнольдса возможно использование анизотропно вязкостных моделей эффекта снижения гидродинамического сопротивления.

Основная часть. В рамках исследований, проведенных в [3] были изучены теоретические описания эффекта снижения турбулентного трения жидкостей, добавками высокомолекулярных полимеров, определено, что возможно два подхода – континуальный и структурный [6].

С целью получения более простых соотношений в прикладных расчетах в работах [1,2,3,5] построены осредненные двух- и трехслойные модели течения жидкости с полимерными добавками. Для этих моделей введен осредненный коэффициент анизотропии динамической вязкости A, который определен путем перехода к отношению 'n осредненных частот колмогоровского возмущения в растворителе к первой частоте релаксации полимерной молекулы:

$$A = 1 + 0{,}72 \cdot arctg \cdot (0{,}166c \cdot M^{0{,}85}) \sum_{p=1}^{N} \frac{1}{p} \cdot arctg \cdot \frac{(n^{3/2} - 1)p}{n^{3/2} + p^2}, \qquad (1)$$

где: с, М – концентрация и молекулярная масса полимера, p – количество сегментов в молекулярной цепи полимера.

Выражение (1) может быть использовано для построения двух- и трехслойной моделей снижения гидродинамического сопротивления в турбулентных течениях с полимерными добавками.

В [3] проведены расчеты по двухслойной модели зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления λ от числа Рейнольдса Re (рисунок 1) для течения в трубе диаметром d = 9 10^{-3} м воды (кривая 1) и водных растворов полиэтиленоксида концентрации c = 2 10^{-6}; 5 10^{-6}; 10^{-5}; 5 10^{-5} г/см^3 (кривые 2,3,4,5 соответственно), данные эксперимента для тех же концентраций полиэтиленоксида (кривые 2', 3', 4', 5'), где молекулярная масса полиэтиленоксида M= $3\cdot10^6$, а число сегментов в молекулярной цепи N = 10. Здесь же кривая 6 описывает предельное снижение гидродинамического сопротивления (асимптота Вирка): $1/\lambda^{0,5}=9.5\lg(Re\lambda^{0,5})$ – 19,06. Можно сказать, что в области больших чисел Рейнольдса для всех концентраций полиэтиленоксида результаты теории и эксперимента согласуются удовлетворительно.

В трехслойной модели между вязким слоем у стенки и полностью турбулентной областью вводится переходная зона, учитывающая взаимодействие молекулярного и молярного обмена. При этом коэффициент гидродинамического сопротивления жидкостей с полимерными добавками рассчитывается по формуле:

$$\lambda = 8\left(\frac{u_*}{u_p}\right)^2 = 8\left(\frac{u_*}{u_p^1 + u_p^{11} + u_p^{111}}\right)^2 . \qquad (2)$$

где: u', u^{11} и u''' – средне расходные скорости, определенные по области вязкого слоя, переходной зоне и турбулентному ядру течения соответственно. А на рис.2 представлены результаты расчетов коэффициента λ, по трехслойной модели. Обозначения и экспериментальные данные те же, что и на рис. 1. Из данных рис. 2 видно, что результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

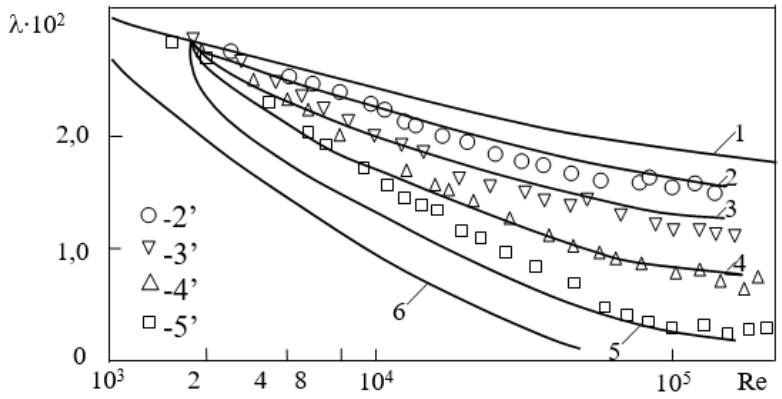


Рис. 1. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивлениярастворов полимеров λ от числа Рейнольдса Re (2'-5' – экспериментальные данные, 1-6 – результаты расчета)

При сравнении результатов расчета с экспериментальными данными видно, что трехслойная модель с достаточной степенью точности может быть использована для расчета гидродинамического сопротивления турбулентных течений с полимерными добавками во всей области изменения чисел Рейнольдса, а двухслойная модель – при больших числах Рейнольдса. При этом трехслойная модель может также использоваться для расчетов зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса при максимальном (предельном) снижении гидродинамического сопротивления трения.

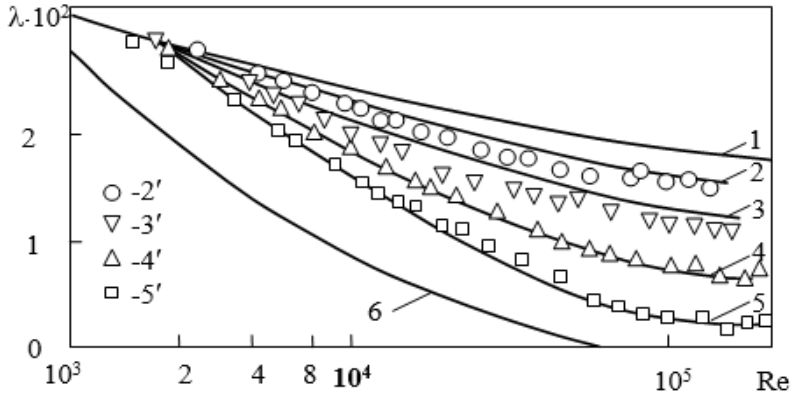


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления растворов полимеров λ от числа Рейнольдса Re (1’-5’ – экспериментальные данные, 1-5 – результаты расчета)

Выводы. С целью получения более простых соотношений в прикладных расчетах построены осредненные двух- и трехслойная модель течения жидкостей с полимерными добавками. Для этих моделей введен осредненный коэффициент анизотропии динамической вязкости с переходом к отношению средних частот Колмогоровского возмущения в растворителе к первой частоте релаксации полимерных молекул.

Список литературы

1. Ступин, А. Б. Анизотропновязкостные модели эффекта снижения гидродинамического сопротивления / А. Б. Ступин, Н. В. Быковская // Научно-технический сборник «Теоретическая и прикладная механика». – Донецк. – 1996. – Вып. 26. – С. 135-141.
2. Bykovskaya N.V. and Stupin A.B. Anisotropoviscous models of the phenomenon of reduction of hydrodynamic resistance // Journal of mathematical sciences. A Translation of Selected Russian- Language Serial Publication in Mathematics/ – Consultants Bureau, New York. – 1997. – Vol 86. – No 6. – P. 3172–3175. – DOI: 10.1007/BF02355721.
3. Быковская, Н. В. Применение гидродинамически-активных полимерных композиций для повышения эффективности работы систем противопожарной техники и аварийной откачки воды. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность. – Донецк, ДонНУ, 2004. – ДонНУ. – 206 с.
4. Ступин, А. Б. Расчет турбулентного сопротивления растворов полимеров в трубах / А. Б. Ступин, Н. В. Быковская // Научно-технический сборник «Теоретическая и прикладная механика». – Донецк. – 1998. – Вып. 28. – С. 137-142.

5. Быковская, Н. В. Влияние деструкции полимеров на снижение гидродинамического сопротивления / Н. В. Быковская // Весник Донецкого университета. Серия А. Естественные науки. – Донецк. – 1998. – № 1. – С. 54-56.
6. Гидродинамически-активные полимерные композиции в пожаротушении / А. Б. Ступин, А. П. Симоненко, П. В. Асланов и др. – Донецк: ДонНУ, 2000. – 198 с.
7. Пилипенко, В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения / В. Н. Пилипенко // В кн.: Итоги науки и техники. ВИНИТИ АН СССР/ Сер.: Механика жидкости и газа, 1980. – Т. 15. – С. 156-257.

УДК 621.438:621.311.22

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА (СОЦВ) ГАЗОВЫХ ТУРБИН В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД (НА ПРИМЕРЕ ГТУ-405,6 (9НА.01) КАЗАНСКОЙ ТЭЦ-3)

Гайнетдинов Т.И.,
Закиров Р.Н., канд. техн. наук, доц., ORCID 0009-0005-3310-0272
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, РФ
gainetdinov38@gmail.com, zakirov.kgeu@mail.ru

Введение. С наступлением летних месяцев нагрузка на энергосистему увеличивается, тогда как возможности газотурбинных установок (ГТУ) по выдаче мощности, напротив, сокращаются: при повышении температуры воздуха на входе в компрессор его плотность падает, и через проточную часть машины проходит меньшая масса рабочего тела [1, 2]. Сгладить это несоответствие позволяет система охлаждения циклового воздуха (СОЦВ), в которой роль охладителя выполняет абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина (АБХМ), работающая за счёт низкопотенциального тепла самой станции, а не покупной электроэнергии [4]. Настоящая работа посвящена количественной оценке того, какой эффект даёт установка такой машины на газотурбинном блоке ГТУ-405,6 (9НА.01) Казанской ТЭЦ-3 в тёплое время года.

Основная часть. За основу термодинамического расчёта принят простой цикл Брайтона, в котором учтены внутренние потери в компрессоре и турбине. Удельная работа, затрачиваемая компрессором на сжатие воздуха, записывается в виде

$$L_k = \frac{C_{p\text{в}} \cdot T_1 \cdot (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1)}{\eta_k},$$

а электрическая мощность установки, получаемая с учётом расхода воздуха $G_\text{в}$ и КПД механической передачи и генератора, – в виде

$$N = G_\text{В} \cdot L_e \cdot \eta_\text{м} \cdot \eta_\text{г},$$

а итоговый КПД станции – отношением мощности к теплоте Q_1, подведённой с топливом:

$$\eta_{\text{ГТУ}} = \frac{N}{Q_1}.$$

Здесь T_1 – температура воздуха перед компрессором; $\pi = 21{,}8$; $\eta_к = 89{,}5$ %, $\eta_т = 92{,}0$ % – паспортные КПД компрессора и турбины. $G_в$ при $T_{вэ} = 288$ К подобран так, чтобы расчётная мощность совпала с паспортной $N_{паспорт}$ = 405,6 МВт [6]; получено 690,3 кг/с.

Расчёт проведён отдельно для каждых из 153 суток летнего сезона 2025 года (май–сентябрь) в двух вариантах: без охлаждения воздуха (по фактической температуре) и с охлаждением (температура принудительно снижается до +15 °C в те дни, когда фактическая температура была выше). Порог +15 °C был превышен в 136 сутках, то есть почти 9 из 10 дней сезона; средняя температура в эти дни составила 23,3 °C, а наибольшая – 34 °C. Без СОЦВ средняя мощность турбины за сезон оказалась равна 388,7 МВт – на 4,2 % меньше номинала; с включённой АБХМ мощность поднимается до 406,5 МВт (прирост 4,6 %), тогда как КПД меняется незначительно – лишь на 0,12 процентного пункта, что согласуется с данными [4, 5] для установок другой единичной мощности (рис.).

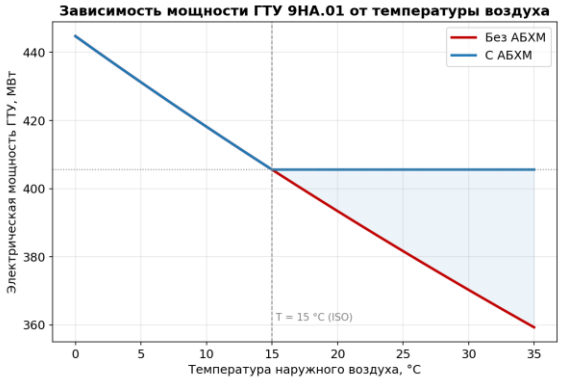


Рис. Зависимость мощности ГТУ 9HA.01 от температуры воздуха

Исходя из теплового баланса воздушного потока, холодопроизводительность, которую должна обеспечить АБХМ, составляет около 13,2 МВт – это значение попадает в линейку машин мощностью 5–15 МВт, цена которых, по данным поставщика, около 150 млн руб. [7]. Срок окупаемости капитальных вложений рассчитывается как:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\text{К}}{\Delta N}.$$

где К – капитальные затраты, ΔN – среднегодовой экономический эффект (36,0 млн руб. при принятых условиях эксплуатации). Подставив К = 150 млн руб., получаем $T_{ок} \approx 4{,}2$ года. Если же ориентироваться на иную форму ценообразования того же поставщика – стоимость «за мегаватт» холодопроизводительности без привязки к конкретному типоразмеру (К ≈ 1060 млн руб.) [7], – срок вырастает до 29,4 года. Такое расхождение

говорит о том, что для окончательных выводов нужна не каталожная оценка, а конкретное коммерческое предложение производителя.

Заключение. Выполненные расчёты подтверждают, что охлаждение циклового воздуха абсорбционной машиной восстанавливает располагаемую мощность ГТУ-405,6 (9НА.01) Казанской ТЭЦ-3 практически до номинального уровня, то есть технически задача решается. Экономический же итог неоднозначен: в зависимости от фактической стоимости оборудования окупаемость может занять от 4,2 до 29,4 лет, и этот вопрос требует уточнения по реальному коммерческому предложению.

Список литературы

1. Ямщиков, К. О. Исследование влияния снижения температуры наружного воздуха на эффективность работы стационарной газовой турбины / К. О. Ямщиков, М. В. Савина // сб. науч. тр. – Казань: ФГБОУ ВО «КГЭУ». – С. 208–211.
2. Антипов, Ю. А. Улучшение характеристик газотурбинных установок при повышенных температурах воздуха / Ю. А. Антипов, И. А. Барский, И. К. Шаталов и др. // Вестник РУДН. Инженерные исследования. – 2009. – № 2. – С. 75–79.
3. Мубараков, И. И. Влияние отборов охлаждающего воздуха на эффективность газотурбинной установки / И. И. Мубараков, А. Б. Шигапов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 16–23.
4. Романюк, В. Н. Повышение эффективности использования природного газа / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, Н. А. Коломыцкая и др. // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 2. – С. 72–75.
5. Менделеев, Д. И. Исследование влияния условий эксплуатации на эффективность использования абсорбционно-холодильной машины в цикле газотурбинных и парогазовых установок / Д. И. Менделеев, Г. Е. Марьин, Ю. Я. Галицкий и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 821–831.
6. Новый блок на базе турбины 9НА.01 введён в эксплуатацию на Казанской ТЭЦ-3 [Электронный ресурс] // GE. – 2017. – URL: ge.com (дата обращения: 25.09.2026).
7. Абсорбционные холодильные машины (АБХМ) Thermax: цена, характеристики [Электронный ресурс] // ООО «Энергия холода». – URL: colden.ru/kupit-abhm (дата обращения: 25.09.2026).

УДК 621.313.32:519.876.5

КОНЦЕПЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИНХРОННОГО ГИСТЕРЕЗИСНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Гетьманенко Ф.Б.[1], Петренко А.Г.[2], д-р физ.-мат. наук, проф.,
Анучин А.С.[1], д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-1019-756X
[1]ФБГОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, РФ
[2]ФБГОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
fedorgetmanenko@yandex.ru, t0504712123@yandex.ru, AnuchinAS@mpei.ru

Введение. К современным электромеханическим системам, таким как системы стабилизации, ориентации, гравиметрические и гироскопические устройства, предъявляются высокие эксплуатационные требования: стабильность частоты вращения, плавный пуск, длительная непрерывная работа, простота и надежность конструкции, низкий уровень шума и механический колебаний. В таких системах применяется синхронный гистерезисный двигатель (*далее*, СГД). Электромагнитный момент СГД формируется в результате перемагничивания активного слоя ротора и зависит от магнитных свойств применяемого материала (сплавы железа, хрома и кобальта с выраженными гистерезисными свойствами, например, викаллой). В зависимости от цели исследования применяются концепции математического моделирования различного уровня детализации [3].

Цель работы – систематизировать концепции математического моделирования СГД и определить их применимость для синтеза алгоритмов управления.

Основная часть. Модели СГД различаются по уровням детализации, вычислительной сложности в зависимости от задач исследования. Для синтеза алгоритмов управления СГД, настройки регуляторов и наблюдателей состояния системы требуется быстродействующая математическая модель на основе эквивалентной схемы замещения (*далее*, ОЭМ) СГД [1, 4].

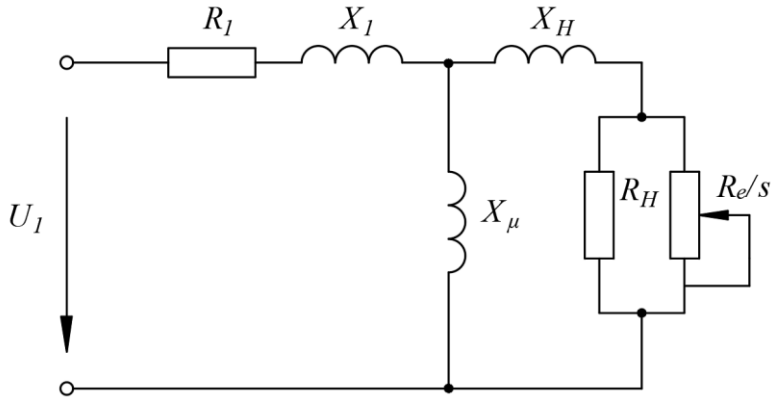


Рис. Схема замещения СГД

Представление магнитного гистерезиса эквивалентной *RL*-цепью (L_H и R_H) снижает вычислительную мощность модели. Однако такое упрощение не воспроизводит нелинейный процесс перемагничивания материала активного слоя ротора и ограничивает точность расчета переходных процессов. Для удобства представления система уравнений СГД приведена в одной системе координат *dq* в матричном виде:

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_s^{\alpha\beta} = \boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta}\boldsymbol{R}_s + \dfrac{d\boldsymbol{\Psi}_s^{\alpha\beta}}{dt} \\ 0 = \boldsymbol{i}_r^{dq}\boldsymbol{R}_r + \dfrac{d\boldsymbol{\Psi}_r^{dq}}{dt} \\ \boldsymbol{\Psi}_s^{\alpha\beta} = \left(L_{s\sigma} + L_{\mu}\right)\boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta} + L_{\mu}\boldsymbol{i}_r^{dq}\boldsymbol{T}^{-1}(\theta) \\ \boldsymbol{\Psi}_r^{dq} = \left(L_H + L_{\mu}\right)\boldsymbol{i}_r^{dq} + L_{\mu}\boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta}\boldsymbol{T}^{-1}(\theta) \end{cases} \quad \begin{cases} \boldsymbol{T}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \\ R_r = \left(\dfrac{1}{R_H} + \dfrac{s}{R_e}\right)^{-1} \end{cases} \tag{1}$$

Для повышения точности описания процесса перемагничивания активного слоя ротора вводятся нелинейные модели магнитного гистерезиса, среди которых модели Прайзаха и Джайлса-Аттертона. Модель Прайзаха воспроизводит как основную кривую намагничивания, так и частные циклы гистерезиса, однако требует хранение и обновление состояний множества гистерезисных операторов, что увеличивает вычислительную мощность. Модель Джайлса-Аттертона задается пятью параметрами и связывает напряженность поля, намагниченность, магнитную индукцию для расчета магнитного состояния ротора [2]. В данной модели допускается равномерное распределение магнитной индукции. Система уравнений в матричном виде для статорной обмотки будет записана в системе координат αβ, а ротора – в *dq*. Модель Джайлса-Аттертона приведена справа и рассчитывается для каждой оси системы *dq*:

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_s^{\alpha\beta} = \boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta}\boldsymbol{R}_s + L_{s\sigma}\dfrac{d\boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta}}{dt} + k_B\dfrac{d\boldsymbol{B}_s^{\alpha\beta}}{dt} \\ \boldsymbol{\Psi}_s^{\alpha\beta} = L_{s\sigma}\boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta} + N_s k_w \boldsymbol{\Phi}_s^{\alpha\beta} \\ \boldsymbol{\Phi}_s^{\alpha\beta} = S_{eff}\boldsymbol{B}_s^{\alpha\beta} \end{cases} \quad \begin{cases} B = \mu_0\left(H + M\right) \\ H_{\text{eff}} = H + \alpha_{JA}M \\ M_{\text{an}} = M_{\text{sat}}\left(\coth\left(\dfrac{H_{\text{eff}}}{a}\right) - \dfrac{a}{H_{\text{eff}}}\right) \\ \dfrac{dM_{\text{irr}}}{dH} = \dfrac{M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}}{k\delta - \alpha_{\text{JA}}\left(M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}\right)} \\ M = cM_{\text{an}} + \left(1-c\right)M_{\text{irr}} \end{cases} \tag{2}$$

где $k_B = k_w N_s S_{\text{эфф}}$ – коэффициент приведения магнитной индукции к потокосцеплению статора.

Наиболее детальное математическое описание СГД обеспечивает трехмерная полевая модель в цилиндрической системе координат, учитывающая геометрию двигателя и пространственное распределение магнитного поля [5]. Уравнения Максвелла в данной модели решаются

относительно магнитного векторного потенциала $\boldsymbol{A}$, причем источниками магнитного поля в данной модели являются как токи фаз статора, так и вихревые токи ротора. Нелинейное перемагничивание активного слоя учитывается векторной моделью Джайлса-Аттертона:

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_s^{\alpha\beta} = \boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta}\boldsymbol{R}_s + \dfrac{d\boldsymbol{\Psi}_s^{\alpha\beta}}{dt} \\ \boldsymbol{\Psi}_s^{\alpha\beta} = L_{s\sigma}\boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta} + \boldsymbol{\Psi}_m^{\alpha\beta} \\ \boldsymbol{\Psi}_m^{\alpha\beta} = \int_\Omega \boldsymbol{w}^T(r,\varphi,z)\boldsymbol{A}d\Omega \\ \boldsymbol{J}_s = \boldsymbol{w}(r,\varphi,z)\boldsymbol{i}_s^{\alpha\beta} \\ \boldsymbol{B} = \mu_0\left(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M}\right) \\ \boldsymbol{B} = \nabla\times\boldsymbol{A} \\ \nabla\times\left(\dfrac{1}{\mu_0}\nabla\times\boldsymbol{A} - \boldsymbol{M}\right) + \sigma\left(\dfrac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t} + \nabla V - \boldsymbol{v}\times\left(\nabla\times\boldsymbol{A}\right)\right) = \boldsymbol{J}_s \end{cases} \quad (3)$$

Заключение. В результате работы были проанализированы основные концепции математического моделирования, определена область их применения. Для синтеза алгоритмов управления наиболее целесообразно использовать модели на основе ОЭМ, дополненные нелинейным гистерезисом по Джайлсу-Аттертону. Это позволит при оптимальной вычислительной мощность детализировать протекающие в СГД электромагнитные процессы. Все варианты предложенных математических концепций моделирования СГД разработаны. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию вычислительной мощности полевой модели и оценку возможности ее применения для разработки алгоритмов управления СГД.

Список литературы

1. Nitao J. J., Scharlemann E. T., Kirkendall B. A. Equivalent circuit modeling of hysteresis motors (№. LLNL-TR-416493). – Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, 2009. – 52 p.
2. Jiles D. Ferromagnetic hysteresis / D. Jiles, D. Atherton // IEEE Transactions on magnetics. – 1983. – V. 19. – №. 5. – P. 2183-2185.
3. Делекторский Б. А. Управляемый гистерезисный привод / Б. А. Делекторский, В. Н. Тарасов. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 126 с.
4. Rahman M. A. Starting and synchronization of permanent magnet hysteresis motors / M. A. Rahman, R. Qin // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1996. – V. 32. – №. 5. – P. 1183-1189.
5. Halvaei Niasar A. Dynamic Modeling and Simulation of a Super High Speed Circumferential Flux Hysteresis Motor / A. Halvaei Niasar, M. Zare, H. Moghbelli // Journal of Engineering. – 2013. – V. 2013. – № 1. – P. 898634.

УДК 504.064.36:574

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Горбунов Р.И., ORCID 0009-0000-8846-6283,
Романчук С.М., канд. техн. наук, ORCID 0009-0005-2356-900X
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
r.gorbunov@donnu.ru, s.romanchuk@donnu.ru

Введение. Особенности региона исследований накладывают свои требования к проведению измерительных экспериментов. Такими «особыми» регионами можно назвать внутренние моря, эстуарии и т. д. Их особенности, в основном, заключаются в сложном химическом составе вод [1]. Таким образом, экспериментальные исследования на указанных объектах являются актуальными и требуют современных методов автоматизации. Для решения подобных задач разрабатывается интеллектуальная система анализа состояния водных объектов (ИСА).

Целью создания ИСА является предупреждение возможных загрязнений на исследуемых водоёмах методами автоматического сбора, интеллектуальной обработки и анализа данных экологического мониторинга, а также ведение автоматического контроля состояния исследуемых природно-технических водных объектов.

Основная часть. Интеллектуальная система анализа, представляет собой совокупность технических решений, направленных на комплексную оценку состояния территориально распределенных объектов. На рисунке 1 представлена структурная схема интеллектуальной системы анализа и прогнозирования состояния выбранного объекта.

Носителем комплекса гидрологических и биофизических датчиков является автоматизированная станция многопараметрических измерений (АСМИ) [2], которая устанавливается в выбранных точках акватории. Для организации беспроводной связи с АСМИ на станции установлен радиомодем. Соединение осуществляется по принципу «точка-точка», то есть для каждой АСМИ на берегу предусмотрена беспроводная станция приёма-передачи данных (СПД). Её главная задача – конвертировать сигналы между АСМИ и центром обработки данных (ЦОД) из радиосигнала в проводной и наоборот. Соединение между СПД и ЦОД реализовано с помощью сети Интернет.

Автоматизированная станция многопараметрических измерений представляет собой комплекс гидрологических датчиков, а именно: разработанных в ДонГУ оптического погружного флуориметра, датчика глубины погружения, измерителя скорости течения, датчика положения в пространстве, а также интегрируемых датчиков температуры, электропро-

водности, мутности, растворенного кислорода, pH, окислительно-восстановительного потенциала. Существует возможность интеграции любого дополнительного датчика с интерфейсом RS-485. Все датчики расположены на специальном носителе, который является корпусом станции и защитной конструкцией. Станция может работать в автоматическом режиме по заранее установленному протоколу либо с передачей управляющих команд (перемещение станции по глубине, выполнение измерений, передача информации) в ручном режиме при наличии проводной связи.



Рис. Структурная схема интеллектуальной системы анализа и прогнозирования состояния природно-технических объектов

ЦОД является центральным элементом интеллектуальной системы. ЦОД представляет собой сервер хранения с подключаемыми к нему модулями. В нём происходит сбор и накопление данных со всех точек измерения, а также хранение протоколов работы для каждой точки. Для работы с ЦОД необходим программный модуль, который реализует обработку и анализ накопленных многомерных данных. Обработанные данные поступают на диспетчерский пункт оператора ИСА.

Оператор ИСА задает алгоритм работы каждой АСМИ, настраивает параметры взаимодействия АСМИ с ЦОД. Оператор АСМИ имеет доступ как к обработанным, так и к первичным данным и всей информации, хранящейся в ЦОД.

Для получения точных прогнозов необходим интеллектуальный модуль прогнозирования, который также подключается к ЦОД. Данный

модуль содержит программные модели исследуемых объектов и имеет доступ к архиву данных. Для обучения системы принятия решений существует модуль ввода данных с результатами лабораторного анализа. Исследователь, согласно разработанным методикам, получает численные параметры объекта, на основании которых выносит свою оценку. Модуль ручного ввода данных позволяет сохранять параметры и оценку в ЦОД, а интеллектуальный модуль прогнозирования использует эти данные для обучения.

Рассчитанный прогноз и данные о текущем состоянии объекта поступают в модуль отображения результатов. Данный модуль рассчитан на конечного пользователя, может быть удалённым и масштабируемым. Его главное отличие от точки оператора ИСА заключается в том, что пользователь модуля отображения результатов не имеет доступа к управлению АСМИ и его настройкам.

Заключение. Разработанная интеллектуальная система анализа прогнозирования состояния природно-технических объектов позволит в непрерывном режиме удалённо осуществлять пространственно-распределённый мониторинг состояния водного объекта. В рамках дальнейших исследований планируется установка разработанной системы на водных объектах Донецкой Народной Республики.

Информация о финансовой поддержке: *Исследования проводились в рамках государственного задания «Комплексная оценка и прогнозирование состояния водных экосистем на основе информации технических средств, биофизических и нейросетевых методов для решения задач экологического мониторинга» (код (шифр) научной темы FRRE-2026-0024).*

Список литературы

1. Ковчин, И. С. Методы специальных океанологических измерений: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Океанология» / И. С. Ковчин, И. А. Степанюк; под общ. ред. И. А. Степанюка; М-во образования Рос. Федерации, Рос. гос. гидрометеорол. ун-т. – СПб.: РГГМУ, 2002. – 270 с.
2. Разработка интеллектуальных систем анализа и прогнозирования состояния природно-технических объектов: отчёт о НИР (заключительный, этап 3) / Донец. гос. ун-т; рук.: С. В. Беспалова; исполн.: С. М. Романчук [и др.] – Донецк, 2025. – С. 269. – №ГР 124012400344-1.

УДК 629.331: 621.333.4

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Горожанкин С.А., д-р техн. наук, проф., ***Степакин В.Р.***
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» –
филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ
s.a.gorozhankin@donnasa.ru, v.r.stepakin@donnasa.ru

Введение. Расширяющееся применение электрических машин в составе силовых установок гибридных электромобилей вызывает необходимость поиска технических решений, направленных на повышение коэффициента полезного действия (КПД) их трансмиссии и оптимизацию распределения потоков мощности для различных режимов движения [1].

Целью данной работы: является комплексное исследование и оценка эффективности работы трансмиссии гибридного электромобиля с параллельной компоновочной схемой гибридной силовой установки (ГСУ).

Основная часть. Эффективность рекуперации. Электрическая энергия, полученная генератором в процессе замедления автомобиля, может быть в лишь частично сохранена в тяговой аккумуляторной батарее (ТАБ).

С учетом коэффициента возврата энергии аккумулятора получаем выражение доли кинетической энергии автомобиля, которая может быть использована при дальнейшем его движении с приводом только от тягового электродвигателя:

$$E_{движ.} = E_{ген.}^{тяг.} \cdot \eta_{ген}^{тр.} \cdot \eta_{ген.}^{эл.} \cdot \eta_{ген}^{пр.} \cdot \eta_{акк.} \cdot \eta_{эл-дв.}^{пр.} \cdot \eta_{эл-дв.}^{эл.} \cdot \eta_{эл-дв.}^{тр.}, \quad (1)$$

где $E_{ген.}^{тяг.}$ – энергия, передаваемая через колеса при торможении; $\eta_{ген}^{тр.}$ – КПД трансмиссии от движителя к валу генератора; $\eta_{ген.}^{эл.}$ – электрический КПД собственно генератора; $\eta_{ген}^{пр.}$ – КПД преобразователя переменного тока в постоянный; $\eta_{акк.}$ – коэффициент возврата энергии, переданной АКБ; $\eta_{эл-дв.}^{пр.}$ – КПД преобразователя постоянного тока в переменный; $\eta_{эл-дв.}^{эл.}$ – электрический КПД собственно электродвигателя; $\eta_{эл-дв.}^{тр.}$ – КПД трансмиссии от электродвигателя к колесам.

Таким образом, произведение группы КПД, является, коэффициентом эффективности рекуперации энергии $\eta_{рек.}$ для гибридной силовой установки транспортного средства (ТС). Данная величина сравнительно невелика и зависит от значений всех составляющих КПД. Если принять значения: $\eta_{ген}^{тр.} = \eta_{эл-дв.}^{тр.} = 0.9$, $\eta_{ген.}^{эл.} = \eta_{эл-дв.}^{эл.} = 0.9$, $\eta_{ген}^{пр.} = \eta_{эл-дв.}^{пр.} = 0.97$ и

$\eta_{акк.} = 0.8$, то оказывается, что доля вышеуказанной кинетической энергии весьма незначительна и составляет около 0.5 ($\eta_{рек.} = 0.494$).

Для количественной оценки эффективности движении гибридного электромобиля от ДВС с одновременной зарядкой аккумулятора, предложен параметр приведенного удельного расхода топлива:

$$g_{прив.} = \frac{M - M_0}{(N_{ДВС}^{тяг.} - N_{ДВС}^{тяг.0}) \cdot \eta_{ген}^{тр.} \cdot \eta_{ген.}^{эл.} \cdot \eta_{ген}^{пр.} \cdot \eta_{акк.}} \quad , \tag{2}$$

где M_0 – расход топлива при движении от ДВС без зарядки ТАБ; M – расход топлива при движении от ДВС с зарядкой ТАБ; $N_{ДВС}^{тяг.}$ – тяговая мощность ДВС при движении с зарядкой ТАБ; $N_{ДВС}^{тяг.0}$ – тяговая мощность ДВС при движении только от ДВС.

Параметр «удельный расход топлива на единицу тяговой работы» определяет рекуперацию электрической энергии, полученной при движении автомобиля на участках с передачей энергии от ДВС к колесам:

$$g_{прив.}^{тяг.} = \frac{M - M_0}{(M\eta_e - M_0\eta_e^0)H_U\eta_{ДВС}^{тр.}} \cdot \frac{1}{\eta_{ген}^{тр.}\eta_{ген.}^{эл.}\eta_{ген}^{пр.}\eta_{акк.}\eta_{эл-дв.}^{пр.}\eta_{эл-дв.}^{эл.}\eta_{эл-дв.}^{тр.}} = g_{прив.}^{ДВС} \cdot k_{прив.}^{ЭМ} \tag{3}$$

В данном выражении коэффициент $k_{прив.}^{ЭМ}$ определяется параметрами всех электрических устройств. Величина $g_{прив.}^{ДВС}$ зависит только от параметров ДВС, а также его трансмиссии.

Предлагаемые параметры $g_{прив.}$ и $g_{прив.}^{тяг.}$, как это следует из (2) и (3) определяются значениями КПД ЭМ, преобразователей тока и качеством ТАБ. Величины КПД указанных устройств достигают 0.85…0.95. Также существенное влияние на данные параметры оказывает эффективный КПД ДВС. Диапазон его изменений на рабочих режимах работы современных двигателей легкого топлива лежит в пределах 0.03…0.3 [2].

Кратность реализации ездового цикла. Для ездового цикла с числом участков n предложено ввести понятие осредненного значения приведенного удельного расхода топлива:

$$\overline{g_{прив.}} = \left(\sum_{i=1}^{n} M_i - \sum_{i=1}^{n} M_{i0} \right) / \sum_{i=1}^{n} \Delta E_{акк.} \quad . \tag{4}$$

Так как $\overline{g_{прив.}}$ определяется не только характеристиками ТС, но и параметрами участков движения ездового цикла, то он может быть использован для сравнения различных гибридных электромобилей в рамках одного ездового цикла.

При достаточной емкости ТАБ становится возможным определить число определенных ездовых циклов, которое можно выполнить за счет аккумулированной энергии. В данном исследовании сравнительные расчеты движения гибридного электромобиля в современном цикле WLTC выполнены с использованием оптимизирующей программы, составленной авторами на языке C^{++}.

Так, исследованиями установлено, что при прохождении автомобилем Changan Uni-K iDD [3] фазы Low_3 цикла WLTC расход электрической энергии составляет 0.64 кВт*ч. С учетом емкости тяговой аккумуляторной батареи 30.7 кВт*ч это позволяет автомобилю пройти 38 таких циклов (117.4 км). Для накопления этой энергии в аккумуляторе при движении в таких же циклах с использованием ДВС предварительно необходимо проехать 59 циклов (180 км).

Коэффициент эффективности зарядки. Важной характеристикой эффективности движения от ДВС с одновременной зарядкой аккумулятора является коэффициент эффективности этой зарядки, определяемый по формуле:

$$\tau = \frac{E_{расх.}^{уч.}}{E_{затр.}^{уч.}} = \frac{\eta_{ген.}^{пр.} \cdot \eta_{ген.}^{эл.} \cdot \eta_{ген.}^{тр.} \cdot \eta_{акк.} \cdot \eta_{эл-дв.}^{пр.} \cdot \eta_{эл-дв.}^{эл.} \cdot \eta_{эл-дв.}^{тр.}}{\eta_{ДВС}^{тр.}}. \quad (5)$$

Это отношение характеризует как полноту зарядки, так и совершенство трансмиссии, преобразователей электрического тока, ЭМ и ТАБ, входящих в состав силовой установки автомобиля.

Заключение. Приведенные аналитические выражения справедливы для гибридного электромобиля Changan Uni-K iDD с параллельной схемой силовой установки. У этого автомобиля рекуперация кинетической энергии движения осуществляется через общую для ДВС и ЭМ трансмиссию. Но для более совершенных трансмиссий, установленных в моделях японских производителей (Toyota Prius, Honda Insight, Hyundai Ioniq Hybrid и др.) вышеприведенные зависимости усложняются.

Список литературы

1. Горожанкин, С. А. Энергетическая эффективность режимов разгона автомобиля с гибридной силовой установкой / С. А. Горожанкин, Н. В. Савенков, В. Р. Степакин // Вестник Донецкого национального университета. – Серия Г: Технические науки. – 2024. – №3. – С. 168-177. DOI 10.5281/zenodo.14018693. EDN HKOECE.
2. Гусаков, С. В. Топливная экономичность силовой установки автомобиля с электромеханической трансмиссией / С. В. Гусаков // Вестник автомобильно-дорожных вузов. – 2015. – № 3. – С. 22-27.
3. Changan UNI-K iDD: Official Technical Specifications and WLTC Certification Data // CarNewsChina Database & Changan Motor Co., Ltd. Technical Press Release, 2024. URL: https://data.carnewschina.com/database/changan/changan-uni-k-idd/2024/params – Текст: электронный.

УДК 622.838.53:669.213.632

ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ БАРЬЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ

Дрибан В.А., д-р техн. наук, с. н. с.,
Дуброва Н.А., канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-2197-902X,
Колесник М.В., м. н. с., ORCID 0009-0008-9267-5684
ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геофизики, геомеханики и маркшейдерского дела», г. Донецк, РФ
viktor_driban@yandex.ru, dubrovan@mail.ru, misha_kolesnik@mail.ru

Введение. Барьерные целики являются важным элементом обеспечения безопасности при подземной разработке угольных месторождений. Как правило их оставляют у затопленных горных выработок и на границах шахтных полей, что должно обеспечивать устойчивость вмещающего массива и препятствовать распространению подземных вод в смежные горные выработки [1]. Потеря устойчивости целика может привести к разрушению прилегающего массива, нарушению устойчивости выработок и возникновению внезапных прорывов шахтных вод.

Традиционные методы оценки устойчивости основаны преимущественно на определении коэффициентов запаса прочности и сравнении действующих напряжений с предельными характеристиками массива, что позволяет получить интегральную оценку несущей способности целика, однако ограниченно учитывает пространственное развитие повреждений и последовательное объединение локальных зон разрушения в сквозные структуры.

Цель работы – разработать алгоритм оценки устойчивости барьерных целиков с применением теории перколяции, что позволит определить критический момент формирования связной системы разрушенных элементов [2, 3].

Основная часть. В предлагаемой модели поперечное сечение барьерного целика шириной W и высотой H разбивается на регулярную квадратную сетку. Каждая ячейка характеризуется напряжением, предельной прочностью и состоянием («целая» или «разрушенная»). Вертикальное напряжение определяется с учётом глубины залегания и плотности породного массива, а геометрический фактор учитывается посредством коэффициента формы целика.

Локальное предельное состояние ячеек определяется по критерию Кулона–Мора [4]. Для достоверного отражения естественной неоднородности массива значения прочностных характеристик отдельных ячеек случайным образом изменяются относительно среднего значения (в исходной модели диапазон вариации составляет 7–37 %). Дополнительно

учитывается длительное снижение прочности в условиях обводнения посредством линейной реологической модели ползучести. Таким образом, при неизменном уровне внешней нагрузки во времени изменяется именно сопротивление массива разрушению.

В процессе реализации алгоритма на каждом временном шаге выполняется проверка условия разрушения: если действующее напряжение превышает текущую прочность ячейки, она переводится в состояние «разрушена». Отметим, что особенностью предлагаемого алгоритма является учёт локального перераспределения «нагрузки», когда после разрушения элемента его «нагрузка» передаётся ближайшим неповреждённым соседям. Такой подход соответствует модели пучка волокон с локальным перераспределением нагрузки (Local Load Sharing) и позволяет воспроизводить концентрацию напряжений в окрестности развивающейся зоны разрушения [5].

В процессе анализа пространственной связности разрушенных элементов ячейки рассматриваются как вершины графа, а соседние разрушенные ячейки – как связанные элементы. При этом для выявления кластеров используется алгоритм поиска в ширину (BFS). Факт потери устойчивости фиксируется в момент образования сквозного кластера, который соединяет противоположные границы расчётной области и интерпретируется как сквозной путь разрушения через барьерный целик [4].

Важной характеристикой процесса является порог перколяции, который определяется методом Монте-Карло для однородной случайной сетки без учёта напряжений, ползучести и перераспределения нагрузки. Для различных вероятностей разрушения генерируются случайные бинарные матрицы, после чего с помощью BFS определяется наличие сквозного кластера, что позволяет установить статистический порог перколяции [4]. Таким образом, сопоставление фактической доли разрушенных ячеек в момент формирования сквозного кластера с теоретическим порогом перколяции позволяет оценить характер развития повреждений. Если сквозной путь формируется при меньшей доле разрушенных элементов, чем статистический порог, это свидетельствует о локализации разрушения вследствие концентрации напряжений и перераспределения нагрузки. При близости этих значений процесс может рассматриваться как преимущественно статистический.

Отметим, что предлагаемый алгоритм позволяет связать статистическую характеристику перколяционного перехода с физически обусловленным процессом разрушения барьерного целика. В отличие от классического подхода, в котором разрушение элементов носит случайный характер, рассматриваемая модель учитывает неоднородное напряжённое состояние, локальное перераспределение нагрузки и снижение прочности во времени.

Предложенный алгоритм позволит определять три основных параметра: время до потери устойчивости, долю разрушенных ячеек в

критический момент и порог перколяции. При этом в рассматриваемой постановке решается задача долговременной устойчивости барьерного целика в условиях затопленного угольного предприятия: высота столба воды и соответствующие внешние напряжения принимаются постоянными, тогда как физико-механические характеристики вмещающего массива постепенно снижаются.

Заключение. Предложен алгоритм оценки долговременной устойчивости барьерных целиков, объединяющий геомеханическое моделирование и теорию перколяции. В модели учитываются гетерогенный характер среды, снижение прочностных характеристик во времени, локальное перераспределение нагрузки и пространственная связность разрушенных элементов.

Критерием потери несущей способности принимается образование сквозного кластера разрушенных ячеек, соединяющего противоположные границы целика. Применение алгоритма BFS обеспечивает автоматическое выявление такого кластера, а метод Монте-Карло позволяет определить эталонный статистический порог перколяции и сопоставить его с фактическим развитием разрушения.

Разработанный подход может быть использован для оценки долговременной устойчивости барьерных целиков и анализа влияния горно-геологических условий на характер и скорость развития разрушения.

Информация о финансовой поддержке: *Исследования проводились в рамках государственного задания FRSR-2024-001 (номер госрегистрации 124061700020-9).*

Список литературы

1. Оглоблин, Д. Н. Маркшейдерское дело: учебник для вузов / Д. Н. Оглоблин, Г. И. Герасименко, А. Г. Акимов и др. // 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 704 с.
2. Stauffer, D. Introduction to Percolation Theory / D. Stauffer, A. Aharony. – London: Taylor & Francis, 2003. – 192 p.
3. Милетенко, И. В. Моделирование наведенной нарушенности массива пород вблизи горных выработок / И. В. Милетенко, Н. А. Милетенко, В. Н. Одинцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 6. – С. 3-10. – EDN KDLRRF.
4. Jaeger, J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Fundamentals of Rock Mechanics. – Malden: Blackwell Publishing, 2007. – 475 p.
5. Hidalgo, R. C. Bursts in a fiber bundle model with continuous damage / R. C. Hidalgo, F. Kun, H. J. Herrmann // Physical Review E. – 2001. – Vol. 64, No. 6. – 066122. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.066122

УДК 621.039.5

ТИПИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ОТ СЕРИИ В-320 К ПРОЕКТУ ВВЭР-ТОИ

Жаркова В.В., ORCID 0009-0009-8790-5083,
Бускин Р.В., ORCID 0009-0004-3181-4610
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, РФ
veronika.zhark0va@mail.ru, arslan15@yandex.ru

Введение. Развитие энергетики и увеличение ее потребления требуют строительства новых атомных электростанций (АЭС) в короткие сроки с минимально возможными затратами. Типизация проектных решений позволяет перейти от долгого строительства, направленного на конкретную местность, к быстрому проектированию и введению в эксплуатацию АЭС.

Цель работы – рассмотреть модернизацию и типизацию проектов реакторных установок от В-320 до В-510. Задачи: выявить преимущества типизации, проанализировать системы безопасности реакторов и их влияние на распространенность проектов. Особое внимание уделено техническому прогрессу и изменениям при сравнении реакторов разных поколений.

Ключевые слова: типизация, безопасность, реакторная установка, ВВЭР-1000, ВВЭР-ТОИ, АЭС-2006, производство, эксплуатация.

Основная часть. ВВЭР-1000 самый массово серийный построенный энергоблок. Он отличается своей безопасностью и надежностью. Установка В-320 имеет жесткие рамки работы, что делает реактор эталоном среди ныне эксплуатируемых. Преобладает активная система безопасности, способная оперативно реагировать на возможные неполадки и не позволять радиоактивному топливу навредить окружающей среде. Однако, несмотря на массовость проекта, его реализация на каждой атомной станции отличалась из-за географических факторов, а также отсутствия четкого стандарта на отдельные конструкции.

Установки В-392М и В-491 представляют проект АЭС-2006, они имеют комбинированную систему безопасности, сочетая в себе как активную, так и пассивную защиту, небольшие изменения конструкции в зонах облучения привели к уменьшению риска аварий. Также уделено внимание природным факторам, потому что реакторы АЭС-2006 снабжены защитой от землетрясений и ураганов. Относительно ВВЭР-1000, АЭС-2006 обладает большим КПД (от ~31,7 % ВВЭР-1000, до ~35–36 % АЭС-2006), а также более выгоден в производстве, за счет изменения материала корпуса реактора и других его составляющих. Проект имел несовершенства, которые препятствовали его распространению на территории России, реактор ВВЭР-1200 эксплуатировался двумя

проектами: В-392М и В-491, которые имели между собой весомые различия, мешающие его качественной работе.

ВВЭР-ТОИ на данный момент самый новый и мощный реактор в России. Он, как и АЭС-2006, относится к поколению III+, однако является более проработанным и завершенным его представителем. Система безопасности реактора комбинированная, но, в отличие от АЭС-2006, имеет более высокую надежность, способна выдерживать бОльшие нагрузки и дольше работать автономно. Также уменьшен риск аварий, за счет изменений в зонах облучения. Серьезный подход к безопасности делает ВВЭР-ТОИ лучшим вариантом для строительства сейсмически активных регионах, а также районах с суровым климатом. За счет типизации от прошлых поколений и установок, в ВВЭР-ТОИ были заменены или удалены полностью или частично некоторые конструкции и процессы, что позволило сократить расходы на строительство установки и ее дальнейшую эксплуатацию.

Типизация проектов от В-320 (ВВЭР-1000) до В-510 (ВВЭР-ТОИ) привела к модернизации систем проектирования и устранения неполадок установок: ВВЭР-ТОИ получил цифровую модель, описывающую и контролирующую его работу, в то время как ВВЭР-1000 был смоделирован на чертежах, подвела к созданию и вводу в эксплуатацию реакторной установки, способной работать практически в любых условиях, имеющую оптимальную систему безопасности и контроля всего топливного цикла.

За счет типизации систем и механизмов, проработанных на установках ранних поколений, строительство АЭС в России стало происходить быстрее и качественнее. Такой подход позволит в дальнейшем реализовывать и продавать проекты в сжатые сроки в больших количествах.

Заключение. Таким образом, типизация проектных решений от В-320 ДО ВВЭР-ТОИ позволила повысить качество строительства реакторов, а также их автономность и надежность.

Список литературы

1. Габараев, Б. А. Атомная энергетика XXI века [Текст] / Б. А. Габараев, В. Г. Свиридов, Ю. Б. Смирнов и др. – 2-е изд. – Москва: МЭИ, 2020 – 398 с.
2. Крылов, М. Э. Атомные реакторы. История и направления развития / М. Э. Крылов Марсель Эдуардович, А. Ш. Низамова // Нефтегаз.ру. – 2022. – № 8 (128). – URL: https://magazine.neftegaz.ru/articles/oborudovanie/747864-atomnye-reaktory-istoriya-i-napravleniya-razvitiya/?clear_cache=Y (дата обращения: 21.09.2026).
3. Корпус реактора ВВЭР-ТОИ установлен на Курске-2. // World Nuclear News. – URL: https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Reactor-vessel-installed-at-Kursk-2 (дата обращения: 21.09.2026).
4. Эволюция реакторов ВВЭР // ROSATOM. – URL: https://rosatomnewsletter.com/2016/12/21/evolution-of-vver-reactors/ (дата обращения: 21.09.2026).

УДК 681.2

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Ипполитова С.В., ORCID 0009-0000-2920-3854,
Аскарова А.Я., канд. техн. наук**,** доц., ORCID 0009-0007-7379-3127
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
sofya_ippolitova@bk.ru

Прецизионные измерительные приборы относятся к продукции, для которой качество определяется не только соответствием готового изделия установленным требованиям, но и устойчивостью процессов измерения, настройки и контроля. Итоговая проверка позволяет обнаружить несоответствие, однако не всегда показывает причину его возникновения. Поэтому для высокоточного приборостроения целесообразно переносить акцент с выявления дефектов на управление условиями, в которых формируется результат измерения. Процессный подход системы менеджмента качества предполагает управление взаимосвязанными операциями и их показателями [1]. В производстве прецизионной техники это означает необходимость рассматривать технологическое оборудование, средства измерений, условия среды и действия персонала как элементы единой системы.

Одним из ключевых элементов такой системы является менеджмент измерений. ГОСТ Р ИСО 10012-2008 связывает достоверность измерительной информации с подтверждением пригодности оборудования и управлением процессами измерений [2]. Следовательно, контроль качества должен подтверждать не только полученное значение параметра, но и воспроизводимость условий его получения.

Основные причины нестабильности при изготовлении прецизионных приборов можно объединить в четыре группы. Для каждой из них требуется отдельная предупреждающая мера (таблица).

Условия выполнения высокоточных измерений должны рассматриваться как часть технологического процесса. Изменение температуры, влажности или вибрационной обстановки может повлиять на результат, поэтому для критических операций необходимо устанавливать допустимые диапазоны, контролировать их в ходе работы и сохранять соответствующие записи. Аналогичный принцип относится к оборудованию: наличие отметки о поверке не отменяет необходимости оценивать пригодность средства измерений для конкретной операции с учетом диапазона, требуемой точности, условий применения и технического состояния. Для критического оборудования целесообразно

вести историю обслуживания и корректировать интервалы проверок с учетом интенсивности эксплуатации.

Таблица

Направления метрологического контроля качества

Фактор	Риск для качества	Предлагаемая мера
Условия измерений	Смещение и разброс результатов	Контроль температуры, влажности, вибраций; регистрация отклонений
Оборудование	Рост погрешности, снижение повторяемости	Поверка/калибровка, подтверждение пригодности, обслуживание
Персонал	Различия в настройке и контроле	Регламенты, чек-листы, обучение и оценка компетентности
Передача данных	Позднее выявление причин несоответствий	Единая запись результатов и прослеживаемость по изделию и операции

Существенным источником вариативности остается участие персонала. В прецизионном приборостроении часть операций настройки требует высокой квалификации, однако зависимость результата от индивидуального опыта можно уменьшить с помощью стандартизированных последовательностей действий, контрольных листов и обязательной фиксации ключевых параметров. Важна не только подготовка работника, но и подтверждение его компетентности по конкретным операциям. Исследования в области оптико-электронного приборостроения также связывают эффективность метрологического обеспечения с организацией работы метрологических служб и взаимодействием подразделений [3].

Не менее важна прослеживаемость измерительной информации. Если результаты входного контроля, межоперационных измерений и итоговых испытаний хранятся раздельно, затрудняется поиск момента возникновения отклонения. Единая запись должна связывать результат с изделием или партией, примененным средством измерений, исполнителем, датой и условиями операции. Тогда несоответствие становится не только основанием для браковки, но и источником данных для корректирующих действий. Накопленные записи позволяют выявлять повторяющиеся отклонения и определять процессы, для которых необходим усиленный контроль.

Внутренние методики контроля необходимо регулярно пересматривать вместе с изменением конструкции изделия, материалов и технологического оборудования. Формально действующая, но устаревшая инструкция не гарантирует достоверности результата. Практика разработки метрологических стандартов подчеркивает необходимость

учитывать реальные условия выполнения задач и опыт применения нормативных требований [4]. Поэтому систему контроля целесообразно строить как замкнутый цикл: установление метрологических требований – подтверждение пригодности оборудования – измерение в контролируемых условиях – фиксация и анализ результата – корректирующее действие – пересмотр требований. Такой подход переводит контроль из преимущественно итоговой процедуры в инструмент предупреждения причин нестабильности.

Качество прецизионных измерительных приборов зависит от согласованного управления производственными и метрологическими процессами. Для повышения стабильности продукции необходимо контролировать условия измерений, подтверждать пригодность оборудования, стандартизировать действия персонала и обеспечивать прослеживаемость результатов. Использование измерительной информации для анализа причин отклонений позволяет выявлять проблемы на ранних стадиях и своевременно корректировать технологические процедуры. В результате система управления качеством становится ориентированной не только на обнаружение, но и на предупреждение несоответствий.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва: Стандартинформ, 2020.
2. ГОСТ Р ИСО 10012–2008. Менеджмент организации. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию. – Москва: Стандартинформ, 2009.
3. Пацан, А. В. Проблемы метрологического обеспечения в области оптико-электронного приборостроения и пути их решения / А. В. Пацан, А. В. Шабурова // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 6. – С. 50–52. DOI 10.25728/avtprom.2021.06.09.
4. Григин, Н. В. Особенности практики разработки стандартов для повышения их качества в задачах метрологического обеспечения / Н. В. Григин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66. – № 6. – С 19–523. DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-6-519-523.

УДК 681.2

ПРИМЕНЕНИЕ PFMEA ПРИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Ипполитова С.В., ORCID 0009-0000-2920-3854,
Аскарова А.Я., канд. техн. наук**,** доц., ORCID 0009-0007-7379-3127
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
sofya_ippolitova@bk.ru

Качество деталей после механической обработки оценивают по совокупности геометрических параметров и характеристик поверхности. Даже при устойчивом технологическом процессе ошибочный результат измерения может привести к неверному решению о соответствии детали установленным требованиям. Поэтому метрологическое обеспечение является частью системы управления качеством и должно обеспечивать получение достоверной и своевременной измерительной информации о состоянии продукции и процесса.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 10012–2008 результативность процессов измерений обеспечивается установлением метрологических требований, пригодностью измерительного оборудования и управлением условиями выполнения измерений [1]. ГОСТ Р 8.820–2013 относит к элементам метрологического обеспечения средства измерений, методики, вспомогательное оборудование, действия операторов и процедуры подтверждения пригодности [2]. Следовательно, риск недостоверного результата может быть связан не только с техническим состоянием средства измерений, но и с организацией самого контроля.

Для предупреждения подобных ситуаций рассмотрим использование PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis) – анализ видов и последствий потенциальных несоответствий процесса. Метод позволяет заранее определить возможные проблемы, установить их причины и последствия, а затем выбрать предупреждающие мероприятия [3, 4]. Цель работы – показать возможность применения PFMEA для выявления рисков метрологического обеспечения при механической обработке деталей и обоснования мер по их предупреждению.

Для анализа возьмем процесс контроля геометрических параметров деталей в ходе и после механической обработки. Его можно представить как последовательность взаимосвязанных этапов: установление контролируемого параметра и требований к нему, выбор метода и средства измерений, подтверждение пригодности измерительного оборудования, подготовка детали и условий контроля, выполнение измерения, регистрация и интерпретация результата. Такое представление позволяет

рассматривать каждый этап как возможный источник метрологического риска.

Для каждого этапа измерительного процесса определены потенциальные проблемы, их возможные последствия, основные причины и предупреждающие мероприятия.

Таблица

Качественный PFMEA-анализ рисков метрологического обеспечения

Потенциальная проблема	**Возможное последствие**	**Основная причина**	**Предупреждающие мероприятия**
Несвоевременный контроль размера	Позднее выявление отклонения и риск продолжения обработки при нестабильном процессе	Слишком большая периодичность контроля	Операционный контроль первых деталей и последующие измерения по установленной периодичности
Неверный выбор средства измерений	Недостоверное решение о соответствии детали установленным требованиям	Точность или диапазон средства измерений не соответствуют задаче	Проверка пригодности средства измерений и закрепление требований в технологической документации
Неподтвержденный метрологический статус средства измерений	Снижение доверия к результату измерения и риск применения непригодного оборудования	Не проверены сведения о поверке или калибровке перед применением	Проверка метрологического статуса, идентификация и учет применяемых средств измерений
Ошибка оператора	Различия результатов повторных измерений и ошибочное решение о соответствии	Различия в приемах измерения, отсутствие единой методики	Единая методика, обучение персонала и повторный контроль критичных параметров
Влияние условий контроля	Искажение результата измерения	Загрязнение поверхности, температурное влияние и иные внешние факторы	Нормирование условий и подготовка поверхности детали перед измерением

К рискам, требующим первоочередного внимания, относится несвоевременное выявление отклонения размера. ГОСТ Р 8.820–2013 рассматривает своевременность измерительной информации как одно из условий принятия и реализации управляющего решения [2]. При контроле только на окончательной приемке устойчивое отклонение может быть обнаружено после изготовления серии деталей. Операционный контроль первых деталей и последующие измерения по установленной периодичности позволяют раньше получить информацию о состоянии процесса и при необходимости скорректировать технологические параметры.

Значимыми являются также неверный выбор средства измерений и отсутствие подтвержденного метрологического статуса. Для достоверного контроля характеристики средства должны соответствовать измеряемому параметру и установленным метрологическим требованиям, а пригодность оборудования должна быть подтверждена до его применения. Риск ошибок оператора снижается за счет единой методики выполнения измерений, обучения персонала и повторного контроля критичных параметров. Влияние загрязнения поверхности, температуры и других внешних факторов целесообразно уменьшать нормированием условий и подготовкой детали перед контролем.

PFMEA может применяться так же к метрологическому обеспечению технологических операций. Такой анализ позволяет перейти от исправления уже выявленных ошибок к предупреждению ситуаций, при которых результат измерения оказывается недостоверным либо несоответствие обнаруживается слишком поздно [4]. Практическая ценность подхода состоит в том, что результаты анализа можно использовать при выборе средств измерений, установлении периодичности контроля, разработке инструкций для персонала и планировании мероприятий по подтверждению пригодности измерительного оборудования.

Таким образом, качественный PFMEA-анализ позволяет систематизировать риски метрологического обеспечения без введения численных оценок. Основными направлениями предупреждения являются своевременность контроля, правильный выбор и подтверждение пригодности средств измерений, единообразие методик и управление условиями измерений. Это повышает достоверность контроля и позволяет использовать измерительную информацию для предупреждения несоответствий, а не только для их фиксации.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 10012–2008. Менеджмент организации. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию. – Москва: Стандартинформ, 2009.
2. ГОСТ Р 8.820–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2014.
3. ГОСТ Р 27.303–2021 (МЭК 60812:2018). Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021.
4. Пономарев, С. В. Инструменты и методы менеджмента качества: учебное пособие / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, В. Я. Белобрагин и др. – Москва: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 248 с.

УДК 614.8:665.733.004.4

НЕПРЕРЫВНЫЙ МНОГОКАСКАДНЫЙ МОНИТОРИНГ АВИАТОПЛИВА НА ТОПЛИВОЗАПРАВОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ

***Колесниченко А.В.*[1],**
***Кочетова Ж.Ю.*[1,2],** д-р геогр. наук, доц., ORCID 0000-0001-8838-9548,
***Тронин А.Л.*[1],** канд. техн. наук, доц.
[1]ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
[2]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, РФ
zk_vva@mail.ru

Введение. Механические примеси, свободная и растворенная вода в авиационном топливе вызывают эрозионный износ, коррозию и льдообразование в топливной системе, вплоть до отказов двигателей [1]. На топливно-заправочных комплексах (ТЗК) контроль качества реализуется через дискретный отбор проб и лабораторный анализ (2–6 ч), в полевых условиях – через визуальный осмотр, эффективный только для частиц с размерами ≥40–50 мкм. Из‑за дискретности мониторинга кратковременные всплески загрязнений остаются незамеченными, что повышает риск заправки воздушного судна некондиционным топливом [2].

Цель – разработка концепции многопараметрической системы непрерывного мониторинга качества авиационного топлива с функциями предиктивной аналитики.

Основная часть. Предложенная система обеспечивает непрерывный контроль трех видов загрязнений: механических примесей, эмульсионной и растворенной воды. Механические примеси регистрируются оптическим методом по рассеянию лазерного излучения. Поточный анализатор устанавливается на байпасной линии после фильтра тонкой очистки и определяет счетную концентрацию частиц в нескольких размерных группах, что позволяет присвоить топливу класс чистоты по ГОСТ 17216-2001. Чувствительность метода составляет 5 мкм, что на порядок ниже порога визуального контроля. При типовом перепаде давления расход через байпас достаточен для корректной работы датчика без изменения параметров основного трубопровода, что обеспечивает интегрируемость системы в существующую схему ТЗК.

Контроль свободной воды реализован с помощью микроволнового абсорбционного метода, который опирается на различие диэлектрических свойств воды и углеводородной основы топлива. Такой подход обеспечивает высокую чувствительность на уровне 100 ppm, что в 3–5 раз превосходит возможности визуального метода. Двухуровневая схема контроля с двумя влагомерами повышает надежность системы. Первый прибор, установленный на байпасной линии после фильтра‑

водоотделителя, позволяет объективно оценивать эффективность отделения воды. Второй влагомер, размещенный перед заправочным рукавом, выполняет функцию финального дублирующего контроля. Такое распределение контрольных точек дает возможность не только выявлять отклонения, но и локализовать их источник на этапе фильтрации либо на последующих участках технологической линии.

Растворенная вода – наиболее сложный для контроля параметр. Она не задерживается фильтрами-водоотделителями, а при охлаждении топлива переходит в свободную фазу в магистралях воздушного судна. Прямое измерение ее концентрации в потоке серийными приборами нереализуемо, так как погрешность современных влагомеров (500–1000 ppm) на порядки превышает сами измеряемые величины (единицы–десятки ppm). Поэтому в системе предлагается применить косвенный метод оценки растворенной воды, основанный на расчете температуры насыщения топлива водой. Алгоритм включает определение точки росы воздуха по формуле Магнуса-Тетенса [3, 4]:

$$t_{\text{р}} = \frac{b \cdot \gamma}{a - \gamma}, \qquad \gamma = \frac{a \cdot t_{\text{в}}}{b + t_{\text{в}}} + ln\frac{\varphi}{100},$$

где a=17,27 и b=237,7 °C – эмпирические коэффициенты (справочные величины); φ – относительная влажность воздуха, %.

Парциальное давление водяного пара $p_{\text{в}}$ при температуре точки росы $t_{\text{р}}$ определяется по той же формуле Магнуса-Тетенса, но записанной относительно давления:

$$p_{\text{в}} = 6{,}112 \cdot exp\left(\frac{a \cdot t_{\text{р}}}{b + t_{\text{р}}}\right),$$

где 6,112 гПа – давление насыщенного водяного пара при 0 °C.

По давлению $p_{\text{в}}$ с использованием справочных зависимостей растворимости воды в углеводородах для конкретной марки топлива определяется равновесное влагосодержание и соответствующая ему температура насыщения $t_{\text{нас}}$. Если разность между текущей температурой топлива и $t_{\text{нас}}$ становится менее 3 °C, система формирует предупреждение «Риск выпадения конденсата». Погрешность определения точки росы не превышает 1,05 °C. Это составляет 1/3 установленного порога срабатывания, поэтому ошибка не приводит к ложному или пропущенному срабатыванию (запас между погрешностью и порогом ≈2 °C).

Контроль организован по многокаскадной схеме, включающей четыре ступени: 1) входной контроль температуры и давления топлива после приемного устройства; 2) контроль параметров в резервуарном парке, где по температуре топлива и параметрам воздуха рассчитывается температура насыщения; 3) контроль фильтрующего контура (перепады давления на фильтре-водоотделителе и фильтре тонкой очистки, содержание свободной воды после водоотделителя, механические примеси и свободная вода после фильтра тонкой очистки, расход топлива); 4) финальный контроль свободной воды перед заправочным рукавом.

Сопоставление параметров на входе и выходе каждого элемента позволяет локализовать источник загрязнения по технологической цепочке.

Важным элементом системы является предиктивная аналитика, обеспечивающая переход от реактивной модели обслуживания к проактивной. Система формирует четыре вида прогнозов: 1) остаточный ресурс фильтроэлементов, который определяется по темпу роста перепада давления и объему прокачанного топлива, при этом экстраполируется момент достижения порогового перепада 0,07 МПа, и при остатке ресурса 20–30 % выдается сигнал «Плановая замена», а при резком росте перепада – «Аварийная замена»; 2) риск выпадения конденсата из растворенной воды, оцениваемый по запасу между текущей температурой топлива и температурой насыщения; 3) локализация источника загрязнения по разности параметров до и после каждого элемента; 4) тенденция ухудшения качества топлива, выявляемая по архиву данных и трендам.

Аппаратная реализация системы построена на блоке обработки, который выполняет первичную фильтрацию сигналов, расчет производных параметров и пороговый контроль. При достижении критического уровня автоматически отключается заправочный насос, включается светозвуковая сигнализация. Возобновление заправки возможно только после устранения причины и ручного сброса оператором. Все данные передаются в АСУ ТП по протоколу Modbus RTU через интерфейс RS-485 и архивируются.

Заключение. Предложенная система обеспечивает непрерывный контроль механических примесей, свободной и растворенной воды, прогнозирование остаточного ресурса фильтрующих элементов и риска выпадения конденсата, а также автоматическую блокировку заправки при критических отклонениях.

Список литературы

1. Обоснование введения показателя класса чистоты в технические требования на топливо для реактивных двигателей / О. Г. Мальцев, О. Б. Азжеурова, Р. Ю. Молодницкий, В. И. Мариничев // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2025. – № 49. – С. 9-18. – EDN GOKJTQ.
2. Дружинин, Н. А. Метод непрерывного мониторинга обводненности авиатоплива при топливообеспечении воздушных судов: дис. … канд. техн. наук. – М.: МГТУ ГА, 2022. – 116 с.
3. Двойной энергетический эффект в системах теплоснабжения зданий от использования автоматизированных энергосберегающих окон для различных регионов России / В. М. Захаров, Н. Н. Смирнов, А. А. Яблоков [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – № 3. – С. 15–21. – EDN SGIVFV.
4. Определение влажности воздуха в широком диапазоне температур и концентраций / Ж. Ю. Кочетова, О. В. Базарский, Т. А. Кучменко [и др.] // Аналитика и контроль. – 2012. – Т. 16, № 1. – С. 53–60. – EDN OUHEWH.

УДК 662.767

ОБРАЗОВАНИЕ СМОЛ И ОСАЖДЕНИЙ ПРИ СЖИГАНИИ ТКО И RDF НА КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЁТКЕ В ПЕЧАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Корнилова Н.В.
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, РФ
kornilova.nv@bstu.ru

Введение. Сжигание на колосниковой решетке остаётся наиболее распространённой технологией для твёрдых коммунальных отходов: топливо подаётся в шахту почти без подготовки и перемещается по решётке с наклоном от 10° до 25° [2]. RDF отличается высокой неоднородностью, влажностью, зольностью и содержанием хлора, из-за чего при его сжигании возникают шлакование, загрязнение поверхностей нагрева и коррозия [1]. На действующих установках по переработке отходов в энергию наблюдается интенсивная коррозия. В печах малой мощности добавляется ещё одна проблема: короткий тракт и низкая температура газов не обеспечивают полного дожига продуктов пиролиза, и конденсирующиеся смолы ложатся на холодные поверхности вместе с золой.

Причины образования смол и отложений

Смолы образуются в зоне сушки и пиролиза, где органика разлагается при недостатке кислорода. Если газ, выходящий из слоя, не встречает вторичный воздух и зону с достаточной температурой, тяжёлые углеводороды конденсируются на стенках газохода и теплообменника. В малой печи время пребывания газов мало, а неоднородный слой создаёт локальные зоны с нехваткой воздуха [6].

Неорганические осаждения определяются составом топлива. Щелочные металлы, Cl, S и тяжёлые металлы выделяются из слоя или уносятся с него, а затем образуют на теплопередающих поверхностях хлориды и сульфаты, которые ускоряют коррозию. Это показано для котла FASAN (Дания), где отложения зависели от состава сырья и режима котла [3]. Хлор поступает из нескольких источников: по данным диссертации Lisbon IST, 60% HCl образуется из ПВХ, 36 % из бумаги и 4 % из листьев и травы [5]. Температура влияет на форму выделения хлора: ниже 800 °C выделяется органический хлор, выше 900°C подключается неорганический. При этом гранулирование RDF давлением 10 МПа вместо 1 МПа общее количество хлора не меняет, но сдвигает выделение органического хлора на более поздний период из-за роста диффузионного сопротивления.

Механизм коррозии включает накопление отложений, испарение хлоридов металлов и плавление солевых отложений. Для сталей на основе железа существенным становится образование летучих хлоридов железа

вместо защитного оксида [5]. В лабораторных испытаниях использовали газовую смесь N_2-10O_2-5H_2O-0,05HCl при температурах 400°C и 700°C. Предварительное окисление сплавов снижало проникновение хлора при 400 °C. Для отходов характерно содержание хлора на уровне 0,72%, выше, чем у других твёрдых топлив, применяемых в энергетике [5].

Методы борьбы и их сравнение

1. Регулирование горения (вторичный воздух, рециркуляция газов, дожигательная камера). Эффективно против смол, так как разрушает летучие углеводороды до их конденсации. Европейская директива 2010/75/EU, используемая в качестве стандарта во многих странах мира, требует выдержки газов при 850 °C в течение 2 с. Недостаток метода: дополнительный воздух снижает температуру в камере и увеличивает объём газов, а на неоднородном слое подача воздуха требует постоянной подстройки [7]. На хлоридные осаждения метод влияет слабо.

2. Подготовка топлива (удаление ПВХ, сушка, гранулирование). Снижает поступление хлора в слой и стабилизирует состав. Гранулирование замедляет выделение органического хлора [5], но не уменьшает его общее количество. Метод увеличивает стоимость топлива и не исключает хлор, связанный с бумагой и пищевыми отходами.

3. Сульфатирующие добавки (соединения серы, переводящие хлориды щелочей в сульфаты). Уменьшают долю хлоридов в отложениях, но увеличивают выбросы SO_2 и общий объём золы. 4. Материалы и покрытия (наплавка сплавами, предокисление). Защищают металл при температуре стенки 400°C, но не предотвращают рост отложений. Стоимость наплавки оправдывается при больших площадях поверхности.

5. Очистка поверхностей и снижение температуры стенок. Механическая очистка и обдувка удаляют отложения, а понижение температуры стенки уменьшает скорость хлоридной коррозии. Цена метода: более низкий КПД по электрической энергии. Для малых печей, не имеющих пароперегревателя, этот метод чаще всего применим как ограничение температуры теплоносителя.

Наиболее эффективный подход

Отдельный метод не решает обе проблемы, так как смолы определяются условиями горения в газовой фазе, а неорганические осаждения определяются составом топлива и температурой стенок. Для печи малой мощности предлагается использование двух способов:

1) дожигательная камера с температурой 850 °C и временем пребывания 2 с, что убирает причину смолообразования, при этом в качестве толпдива для дожига может быть использован свалочный газ [4];

2) ограничение хлора в топливе за счёт сортировки и удаления ПВХ, в сочетании с низкой температурой теплообменной поверхности, при которой хлоридная коррозия замедляется.

Дополнительные меры (сульфатирующие добавки, наплавка) оправданы при подтверждённых проблемах на конкретной установке.

Выводы. Смолы в малых печах возникают из-за недостаточного времени пребывания и температуры газов, неорганические осаждения из-за хлора, щелочей и серы в топливе. Хлор поступает из нескольких источников: 60 % HCl приходится на ПВХ, 36 % на бумагу. Отбор ПВХ снижает нагрузку, но не устраняет её. Температура определяет форму хлора: ниже 800 °C выделяется органический, выше 900 °C неорганический. Гранулирование RDF задерживает выделение хлора, но не уменьшает его количество.

Для малых печей наиболее эффективно сочетание дожигательной камеры и контроля хлора в топливе.

Список литературы

1. Leckner, B., Lind F. Combustion of municipal solid waste in fluidized bed or on grate – A comparison / B. Leckner, F. Lind // Waste Management. – 2020. – Vol. 109. – P. 94-108. – DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.050.
2. Santos, S. M. Brief Overview of Refuse-Derived Fuel Production and Energetic Valorization: Applied Technology and Main Challenges / S.M. Santos, C. Nobre, P.S.D. Brito, M.M. Gonçalves // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – P. 10342. – DOI: 10.3390/su151310342.
3. Ахмед, А. А. Исследование режимов горения RDF-топлива в котле малой мощности при изменении влажности топлива и коэффициента избытка воздуха / А. А. Ахмед, П. А. Трубаев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2025. – № 3. – С. 13-21. – EDN: ZTSSOC.
4. Deposit Formation in the FASAN WtE Boiler as a Function of Feedstock Composition and Boiler Operation / O. H. Madsen, K. Lundtorp, L. Mortensen et al. // Energy & Fuels. – 2009. – Vol. 23, No. 7. – P. 3490-3496. – DOI: 10.1021/ef8010349.
5. Sharobem, T.T. Mitigation of High Temperature Corrosion in Waste-to-Energy Power Plants: doctoral thesis / T.T. Sharobem. – New York: Columbia University, 2016. – 142 p. – DOI: 10.7916/D8416XFW.
6. Щекин, И. И. Сравнительный анализ методов утилизации ТБО / И. И. Щекин, П. А. Трубаев // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды. – Белгород: БГТУ, 2015. – С. 156-160. – EDN: VWITLD.
7. Корнилова, Н. В. Расчет совместного сжигания биогаза и RDF – топлива / Н. В. Корнилова, П. А. Трубаев // Энергетические системы. – 2020. – № 1. – С. 173-182. – EDN: HDTNOA.

УДК 662.6:543.812

ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ТВЕРДОГО БИОТОПЛИВА И RDF-ТОПЛИВА

Корнилова Н.В.
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, РФ
kornilova.nv@bstu.ru

Выход летучих веществ (V, мас. %) показывает долю массы топлива, которая переходит в газовую фазу при нагреве без доступа воздуха, за вычетом влаги. От V зависят температура воспламенения, устойчивость факела, объём топки и распределение первичного и вторичного воздуха. Нелетучий углерод FC (коксовый остаток, мас. %) находят по разности:

$$\mathrm{FC} = 100 - W^{\mathrm{p}} - A^{\mathrm{p}} - V^{\mathrm{p}},$$

где W^{p}, A^{p} – влажность и зольность на рабочую массу, мас. %

Отношение FC/V^{p} у древесины равно 0,21, у каменного угля при $V = 30\%$ оно равно 2,3. Поэтому при переводе угольного котла на биотопливо изменяют схему подачи воздуха и увеличивают объём топки [1]. Выход летучих веществ входит в классификацию углей по ГОСТ 25543-2013: у антрацитов V^{c} на сухую беззольную массу не превышает 9 %. Для газификации и пиролиза V служит оценкой максимального выхода газа и смол.

Лабораторная методика определения: гравиметрический метод. Навеску 1 г выдерживают в тигле с крышкой в печи при 900°C ± 10°C в течение 7 мин, после загрузки температура печи должна восстановиться за 4 мин. Режим задан в ISO 18123 для твёрдого биотоплива, в ГОСТ 6382-2001 для минерального топлива и в EN 15402 для твёрдого вторичного топлива, к которому относится RDF. ASTM E872 для древесных топлив устанавливает 950 °C при той же выдержке.

Типичные значения выхода летучих веществ приведены в табл. Разброс выхода летучих веществ RDF определяется составом: бумага имеет 85 %, пластик 96 %, текстиль 73 %, пищевые отходы 71 % [3].

Таблица

Выход летучих веществ, мас. % [2, 3]

Топливо	Среднее	Минимум	Максимум	Примечание
Антрацит	4	2	9	V^{r} – на горючую (сухую беззольную) массу
Каменный уголь	28	10	40	
Бурый уголь	48	40	60	
Древесина	83	80	86	V^{c} – на сухую массу
Солома	76	70	81	
Шелуха риса	63	55	68	
RDF	75	60	88	

Проблемы определения выхода летучих веществ для биотоплива и RDF следующие.

1. Наличие карбонатов. В мелованной бумаге и наполнителе пластика имеется $CaCO_3$, который при 900 °C выделяет CO_2 (44 % массы карбоната). Пять процентов $CaCO_3$ в пробе завышают V на 2,2 %. Стандарты на уголь предусматривают поправку на CO_2 карбонатов (ISO 562:2010), в методиках для RDF и биотоплива её применяют не всегда.

2. Наличие хлора и металлов. ПВХ содержит 57 % хлора, и 10 % ПВХ в RDF добавляют к V 5,7 % за счёт HCl. Этот вклад не приводит к выделению теплоты, поэтому V перестаёт отражать энергетическую ценность летучих. Алюминий упаковки при подсосах воздуха окисляется до Al_2O_3 с приростом массы 89 %. Три процента Al занижают V на 2,7 %.

3. Неоднородность. Навеска 1 г должна представлять материал с частицами до 1 мм, а пластики при размоле плавятся и требуют криогенного измельчения. Фрагмент плёнки 0,3 г в навеске 1 г (V = 99 %) при V остальной массы 75 % изменяет результат на 7 %.

4. Поведение биомассы в тигле. Пылевидная фракция выносится газами, пеллеты впитывают влагу при взвешивании, щелочные металлы и хлориды соломы частично улетучиваются. Через неплотную крышку в тигель попадает воздух, кокс догорает, и V завышается.

5. Зависимость от режима. Разница между 900 и 950°C смещает результат, а в топке при скорости нагрева порядка 10^3 К/с реальный выход летучих превышает стандартный. Величина V является условной характеристикой метода, а не константой топлива.

Расчётные способы определения выхода летучих веществ без технического анализа

Известны следующие способы расчета показателя.

Способ 1. Расчёт по высшей теплоте сгорания $Q_в^р$ и зольности. Корреляция Парика для $Q_в^р = 0{,}3536 \cdot FC + 0{,}1559 \cdot V^р - 0{,}0078 \cdot A^р$ [4] после подстановки $FC = 100 - A^р - V^р$ приводит к выражению:

$$V^р = (35{,}36 - 0{,}3614\, A^р - Q_в^р)/0{,}1977.$$

Для древесины с $A^р$ = 1 % и $Q_в^р$ = 19,5 МДж/кг расчет $V^р$ = 78 % при измеренных 82 %. Достоинства: нужны только калориметр и зольность. Недостатки: ошибка в 1 МДж/кг приводит к ошибке в $V^р$ на 5,1 %. Для RDF с пластиками способ непригоден, при $A^р$ = 15% и $Q_в^р$ = 25 МДж/кг результат расчета 25 % вместо 75 %.

Способ 2. Расчёт по элементному составу. Уравнение для содержания кислорода в составе топлива $O^р = 0{,}304 \cdot FC + 0{,}172 \cdot A^р$ [5] позволяет получить уравнение:

$$V^р = (O^р - 0{,}304\,(100 - A^р)) / 0{,}172$$

Для древесины с $O^р$ = 43 % и $A^р$ = 1 % результат расчета $V^р$ = 75 %, отклонение от измеренного значения составляет 7 %. Достоинства: элементный состав топлива, как правило, известен, и CHNS-анализ широко

доступен. Недостаток: кислород при анализе определяется по разности, как остаток от содержания измеренных соединений, и ошибка в его определении в 1 % приводит к погрешности V^{p} 5,8 %. Для RDF с ПВХ необходим учёт хлора.

Способ 3. Аддитивный расчёт по составу. Для биомассы используют содержание целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина с выходами летучих 94, 80 и 60 % соответственно [6]. Древесина с 42 % целлюлозы, 25 % гемицеллюлоз, 28 % лигнина и 4 % экстрактивных веществ (85 %) имеет V^{p} = 80 % (ошибка 2 %). Для RDF применяют морфологический состав. Смесь из 40 % бумаги (V^{p} = 85 %), 30 % пластика (V^{p} = 96 %), 10 % текстиля (V^{p} = 73 %), 5 % древесины (V^{p} = 82 %), 5 % органики (V^{p} = 71 %) и 10 % инертных компонентов имеет расчетный V^{p} = 78 %. Достоинства: расчёт возможен по данным сортировкисипользуя средние данные компонентов [7]. Недостаток: справочные значения компонентов разнятся, взаимодействие компонентов при нагреве не учитывается, вклад карбонатов требует отдельной поправки.

Выводы. Стандартные нормативные методы определения выхода летучих веществ разработаны построены для углей, для биомассы и RDF топлива они обладают рядом заметных погрешностей, и в расчетный метод по составу топлива может повысить точность показателя.

Список литературы

1. Щекин, И. И. Сравнительный анализ методов утилизации ТБО / И. И. Щекин, П. А. Трубаев // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды. – Белгород: БГТУ, 2015. – С. 156-160. – EDN: VWITLD.
2. An overview of the chemical composition of biomass / S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C. G. Vassileva // Fuel. – 2010. – Vol. 89. – P. 913–933. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.10.022
3. Tchobanoglous, G. Integrated Solid Waste Management / G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil. – N.-Y.: McGraw-Hill, 1993. – 978 p.
4. Parikh, J. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels / J. Parikh, S. A. Channiwala, G. K. Ghosal // Fuel. – 2005. – Vol. 84. – P. 487–494. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.10.010.
5. Parikh, J. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials / J. Parikh, S. A. Channiwala, G. K. Ghosal // Fuel. 2007. – Vol. 86. – P. 1710–1719. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.029
6. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis / H. Yang, R. Yan, H. Chen et al. // Fuel. – 2007. – Vol. 86. – P. 1781–1788. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013
7. Корнилова, Н. В. Разработка методики теплотехнических расчетов по приведённым характеристикам RDF-топлив / Н. В. Корнилова, П. А. Трубаев // Энергетические системы. – 2018. – № 1. – С. 214-223. – EDN: CVELZB.

УДК 621.311.25:621.175

БРЫЗГАЛЬНЫЕ БАССЕЙНЫ И ГРАДИРНИ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ АЭС: КРИТЕРИИ ВЫБОРА

Кузьмин А.В., ORCID 0009-0006-5140-4488, ***Черкасов А.С.***
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, РФ
lakomkytha@gmail.com, sanekpuer@mail.ru

Система технического водоснабжения (СТВ) атомной электростанции (АЭС) – один из ключевых технологических контуров, обеспечивающих отвод низкопотенциального тепла от конденсаторов турбин и вспомогательного оборудования. От эффективности охлаждения циркуляционной воды напрямую зависят вакуум в конденсаторе, тепловая экономичность паротурбинной установки и, как следствие, выработка электроэнергии [1]. Для реактора мощностью 1000 МВт(эл.) необходимо сбрасывать в окружающую среду около 2000 МВт тепловой мощности, что делает выбор типа охладителя задачей первостепенной важности [2].

Целью данной работы является сравнение брызгальных бассейнов и градирен по основным технико-эксплуатационным критериям и определить рациональные области их применения в системе технического водоснабжения АЭС.

На современных АЭС России применяются три основных типа охладителей оборотных систем: пруды-охладители, брызгальные бассейны и градирни. В условиях ограниченного дебита водоисточника и ужесточения экологических требований к тепловому воздействию на водные объекты предпочтение отдаётся замкнутым оборотным системам с градирнями или брызгальными бассейнами. В настоящей работе проведён сравнительный анализ двух последних типов охладителей и сформулированы критерии их выбора для применения на АЭС.

Конструкция и принцип работы брызгального бассейна. Брызгальный бассейн представляет собой искусственный водоём глубиной не менее 1,5 м, над которым смонтирована сеть распределительных труб с распыляющими соплами [3]. Нагретая вода подаётся циркуляционными насосами под давлением 0,1 МПа, разбрызгивается на капли диаметром 1,5–2 мм и охлаждается за счёт испарения и конвективного теплообмена с атмосферным воздухом. Ширина бассейна составляет 50–55 м для обеспечения доступа воздуха ко всем соплам; расстояние от крайних сопл до борта – не менее 7 м во избежание уноса капель ветром [3; 4].

Согласно СТО 1.1.1.02.006.0689-2006, брызгальные бассейны применяются при невысоких требованиях к эффекту охлаждения и наличии открытой площади для доступа воздуха [1]. На АЭС с реакторами ВВЭР они используются преимущественно для охлаждения воды промежуточных контуров реакторного зала и систем аварийного

охлаждения зоны. Например, на Курской АЭС-2 брызгальные бассейны входят в состав системы охлаждения ответственных потребителей [5].

Конструкция и принцип работы башенной градирни. Башенная градирня – это инженерное сооружение, состоящее из вытяжной башни (высотой до 170 м), водораспределительной системы, оросителя, водосборного бассейна и влагоулавливающего устройства [4]. Нагретая вода поднимается к водораспределительному уровню и стекает вниз по оросителю тонкой плёнкой. Воздух движется вверх за счёт естественной тяги, возникающей из-за разности плотностей нагретого воздуха внутри башни и холодного снаружи. Охлаждение происходит за счёт испарения (70–80 % отводимого тепла) и конвекции [2; 6].

Для АЭС применяются преимущественно применяются башенные градирни с естественной тягой противоточного типа [3]. Согласно Поварову на Нововоронежской АЭС-2 (энергоблоки № 1, 2 с реакторами ВВЭР-1200) установлены башенные испарительные градирни, у которых максимальная проектная температура охлаждённой воды на входе в конденсатор составляет +31°С, однако в летние периоды фактическая температура может превышать это проектное значение [6].

Таблица

Сравнительная характеристика брызгальных бассейнов и башенных градирен

Критерий	**Брызгальный бассейн**	**Башенная градирня**
Эффективность охлаждения	Ниже: охлаждение на 5–10 °С, зависит от ветра [4]	Выше: охлаждение на 6–12 °С, устойчивое [4]
Площадь застройки	В 10–20 раз больше площади градирни [7]	Минимальная среди охладителей [4; 7]
Капельный унос воды	0,75–3,0 % от расхода [4]	0,01–0,05 % (с водоуловителями) [4]
Капитальные затраты	Ниже (более простая конструкция) [4]	Выше (сложное сооружение) [2; 4]
Зависимость от ветра	Высокая: ветер усиливает унос и охлаждение [4]	Низкая: тяга от башни [4]
Образование тумана	Возможно, риск обледенения зимой [4]	Минимальное (пар рассеивается) [4]
Применение на АЭС	Охлаждение ответственных потребителей [5]	Охлаждение конденсаторов турбин [6]

Как видно из таблицы, брызгальные бассейны уступают градирням по глубине и устойчивости охлаждения, однако имеют преимущество в простоте конструкции и меньших капитальных затратах. Потери воды на капельный унос в брызгальных бассейнах составляют 0,75–3,0 % от расхода циркуляционной воды, тогда как в башенных градирнях с водоуловителями – всего 0,01–0,05 % [4]. Это определяет разницу в требуемом объёме подпиточной воды и, соответственно, в экологической нагрузке на водоисточник.

Брызгальные бассейны сильно зависят от скорости ветра: при его усилении охлаждение улучшается, но растёт унос капель, что может приводить к обледенению соседних сооружений зимой [3]. Башенные градирни обеспечивают стабильное охлаждение за счёт естественной тяги, практически не зависящей от ветра [4].

Капитальные затраты на башенную градирню выше, однако её площадь застройки в 10–20 раз меньше, чем у брызгального бассейна [7].

Выбор типа охладителя для СТВ АЭС определяется комплексом технико-экономических и экологических факторов. Башенные градирни предпочтительны для охлаждения конденсаторов турбин благодаря глубокому и устойчивому охлаждению, минимальным потерям воды и малой площади застройки. Брызгальные бассейны целесообразно применять для охлаждения вспомогательного оборудования и систем безопасности, где не требуется глубокое охлаждение, но важны простота конструкции и надёжность. На практике эти подходы дополняют друг друга: так, на Нововоронежской АЭС для основных энергоблоков используются башенные градирни, а брызгальные бассейны применяются на Курской АЭС-2 в системе ответственных потребителей [5; 6].

Список литературы

1. СТО 1.1.1.02.006.0689-2006. Водопользование на атомных станциях. Классификация охлаждающих систем водоснабжения. – Введ. 2006-12-20. – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2006. – 16 с. – Текст: непосредственный.
2. Еперин, А. П. О проблеме охлаждения технической воды атомных электрических станций / А. П. Еперин // Биосфера. – 2011. – Т. 3, № 1. – 3 с. – EDN NXNEKV. – Текст: непосредственный.
3. Основные системы энергоблока с реактором РБМК-1000: учеб. пособие / В. И. Слободчук, С. Т. Лескин, А. С. Шелегов, Д. Ю. Кашин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – Гл. 10: Система технического водоснабжения. – С. 44–50. – ISBN 978-5-7262-2752-8. – Текст: непосредственный.
4. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. – Введ. 1985-01-01. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 130 с. – Текст: непосредственный.
5. Эксплуатация системы оборотного водоснабжения на АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1200 / А. А. Титов // Молодой ученый. – 2024. – № 31 (569). – С. 101–105. – URL: https://moluch.ru/archive/569/124688 (дата обращения: 23.09.2026). – Текст: электронный.
6. Поваров, В. П. Опыт эксплуатации и пути повышения эффективности работы системы технического водоснабжения энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2 / В. П. Поваров, Д. Б. Стацура, Д. Е. Усачев // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 2. – С. 5–16. – DOI 10.26583/npe.2020.2.01. – Текст: непосредственный
7. Cooling water options for the next generation of UK nuclear power stations / Environment Agency. – Bristol: Environment Agency, 2010. – 154 p. – (Science report: SC070015/SR). – Текст: непосредственный.

УДК 621.039.5

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУР ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ НИТОК ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА НА БЩУ

Кузьмин А.В., ORCID 0009-0006-5140-4488, ***Черкасов А.С.***
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, РФ
lakomkytha@gmail.com, sanekpuer@mail.ru

Безопасность атомной электростанции (АЭС) с реактором типа ВВЭР обеспечивается глубокоэшелонированной защитой, основанной на системе физических барьеров и технических мер по их защите [1]. Одним из ключевых барьеров является граница контура теплоносителя реактора, целостность и нормальное функционирование которого зависят от точного контроля термогидравлических параметров первого контура. Контроль температур горячей и холодной ниток главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) – один из важнейших параметров, непрерывно контролируемых на блочном щите управления (БЩУ).

Целью настоящей работы является рассмотрение принципов организации термоконтроля ниток ГЦТ на энергоблоках с реактором ВВЭР-1000 и оценка его роли в обеспечении безопасной эксплуатации.

Главный циркуляционный трубопровод соединяет реактор, парогенератор и главный циркуляционный насос (ГЦН) в единую циркуляционную петлю. На энергоблоке с реактором ВВЭР-1000 предусмотрены четыре петли циркуляции. Теплоноситель (вода под давлением около 16 МПа) нагревается в активной зоне реактора до температуры около 322 °С и по «горячим» ниткам поступает в парогенераторы, где отдаёт часть тепла второму контуру. Охлаждённый до 289 °С теплоноситель по «холодным» ниткам через ГЦН возвращается в реактор [2]. Таким образом, перепад температур между горячей и холодной нитками в каждой петле характеризует количество тепла, переданного во второй контур, и является основой для расчёта тепловой мощности реактора.

Измерение температуры теплоносителя в нитках ГЦТ осуществляется системой внутриреакторного контроля (СВРК), которая является основной частью комплексной системы контроля, управления и диагностики (СКУД) реакторной установки [3]. В каждой горячей и холодной нитке установлены два типа преобразователей: термоэлектрические преобразователи (термопары типа ТХА – хромель-алюмелевые) и термопреобразователи сопротивления (платиновые ТСП). Термопары обладают большей надёжностью в условиях радиационного облучения и применяются для массовых измерений. Термометры сопротивления обеспечивают более высокую точность и используются для калибровки термопар первого контура [4].

В модернизированной системе СВРК-М все датчики имеют индивидуальные статические характеристики, что позволяет снизить аппаратурную погрешность каналов контроля температуры до 0,5°C для термометров сопротивления и 1,0°C для термопар. Дополнительно на всех энергоблоках ВВЭР-1000 проводится процедура тарировки датчиков температуры, в результате которой погрешность уменьшается ещё на 0,1–0,3°C [3]. Схема организации термоконтроля представлена на рисунке.

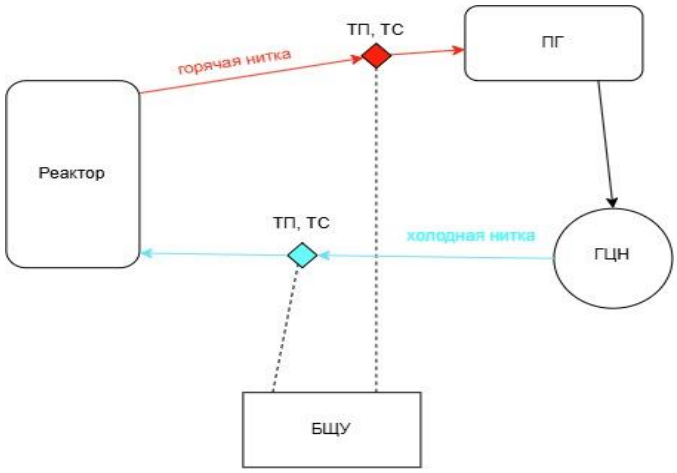


Рис. Схема контроля температур ниток ГЦТ на энергоблоке с ВВЭР-1000
(ТП – термопара, ТС – термометр сопротивления)

Сигналы от датчиков температуры поступают в измерительную аппаратуру СВРК, где происходит первичная обработка, а затем – на БЩУ, где оператору в цифровой и графической форме представляется информация о температурах во всех четырёх петлях. На панелях БЩУ выведены индикаторы температур горячих и холодных ниток, а также разности этих температур. По результатам измерений формируются сигналы предупредительной и аварийной защиты, а также блокировки по принципу «2 из 4» по петлям или «2 из 3» по каналам СУЗ [4].

Разность температур ΔT между горячей и холодной нитками в каждой петле является ключевым параметром для расчёта тепловой мощности реактора. Тепловая мощность по каждой петле определяется как произведение массового расхода теплоносителя на разность энтальпий горячей и холодной ниток. Сумма мощностей по всем петлям даёт полную тепловую мощность реактора [5]. Этот метод, называемый методом теплового баланса первого контура, используется как основной способ оперативного контроля мощности. На основе этих вычислений формируются не только информационные гистограммы для персонала БЩУ, но и управляющие воздействия для управляющих систем безопасности. Превышение заданных уставок по разности температур или скорости их изменения инициирует автоматическое ограничение мощности реактора.

Помимо расчёта мощности, данные термоконтроля ниток ГЦТ используются в диагностических целях. По показаниям температурных датчиков система автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР), входящая в состав СКУД, рассчитывает напряжённо-деформированное состояние трубопроводов и оценивает усталостный износ металла [3]. Кроме того, анализируется температурная стратификация теплоносителя в горячих нитках – неоднородность температуры по сечению трубопровода, которая может указывать на нарушение циркуляции или иные аномалии [5]. Постоянный мониторинг этих отклонений помогает операторам вовремя заметить неравномерное охлаждение петель и предотвратить опасные тепловые удары по оборудованию. Также эти данные позволяют точнее планировать объемы ремонтных работ во время планово-предупредительных ремонтов энергоблока.

Контроль температур горячей и холодной ниток ГЦТ на БЩУ представляет собой одну из важнейших функций системы внутриреакторного контроля, обеспечивающих безопасную и экономичную эксплуатацию энергоблока с реактором ВВЭР-1000. Точность измерения температуры в петлях первого контура напрямую влияет на достоверность расчёта тепловой мощности реактора и формирование сигналов защиты. Современные системы СВРК-М, внедряемые на действующих и проектируемых энергоблоках, обеспечивают требуемую точность термоконтроля за счёт использования датчиков с индивидуальными градуировочными характеристиками и процедуры тарировки. Дальнейшее совершенствование систем термоконтроля связано с повышением точности измерительных каналов и развитием диагностических функций.

Список литературы

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15): федер. нормы и правила в области использования атом. энергии: утв. приказом Ростехнадзора от 17.12.2015 № 522. – Текст: непосредственный.
2. Резепов, В. К. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций / В. К. Резепов, В. П. Денисов, Н. А. Кирилюк, Ю. Г. Драгунов. – Москва: Академкнига, 2004. – 333 с. – ISBN 5-94628-185-2. – Текст: непосредственный.
3. Калинушкин, А. Е. Современная система контроля, управления и диагностики реакторов ВВЭР большой мощности / А. Е. Калинушкин, Ю. М. Семченков // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2 (88). – С. 81-85. – Текст: непосредственный.
4. Белозеров, В. И. Физика и эксплуатационные режимы реактора ВВЭР-1000: монография / В. И. Белозеров, М. М. Жук, Ю. А. Кузина, М. Ю. Терновых; Нац. исслед. ядерный ун-т «МИФИ». – Москва: НИЯУ МИФИ, 2014. – 287 с. – ISBN 978-5-7262-2016-1. – Текст: непосредственный.
5. Аверьянова, С. П. Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 / С. П. Аверьянова, А. А. Дубов, К. Б. Косоуров, П. Е. Филимонов // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108, вып. 2. – С. 198–201. – Текст: непосредственный.

УДК 621.039.58: 681.518.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРАКТИК ПУСКОНАЛАДКИ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПЕРЕД ВЫХОДОМ АТОМНОГО ЭНЕРГОБЛОКА НА МОЩНОСТЬ

Кузьмин А.В., ORCID 0009-0006-5140-4488, ***Черкасов А.С.***
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, РФ
lakomkytha@gmail.com, sanekpuer@mail.ru

Ввод энергоблока АЭС в эксплуатацию требует подтверждения того, что оборудование и системы выполняют предусмотренные проектом функции. Для КИПиА недостаточно установить исправность отдельных приборов: необходимо подтвердить достоверность измерительной информации, соответствие уставок и работу измерительных каналов в составе автоматизированных систем. Поэтому пусконаладку целесообразно рассматривать как последовательность взаимосвязанных проверок, завершающуюся подтверждением системной функции. При этом подходы к организации ПНР КИПиА могут существенно различаться в зависимости от проекта энергоблока и применённой архитектуры АСУ ТП, что до настоящего времени не получило систематического сравнительного анализа в опубликованной литературе.

Цель работы – сопоставить практики пусконаладки КИПиА, применённые при вводе энергоблоков АЭС проекта АЭС-2006 на разных площадках (Нововоронежская АЭС-2, Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС), выявить различия в организации работ и предложить обобщённую модель контроля готовности измерительных систем к выходу на мощность.

СТО НОСТРОЙ 2.24.91-2013 устанавливает общие требования к организации и выполнению ПНР при сооружении и вводе в эксплуатацию объектов использования атомной энергии, определяя ПНР как комплекс проверки, настройки и испытаний, направленный на достижение проектных параметров [1]. Метрологическая составляющая определяется ГОСТ Р 70518-2022, который рассматривает в качестве объектов метрологического обеспечения средства измерений и измерительные каналы, поэтому проверка должна охватывать весь тракт формирования измерительной информации [2]. Для систем, важных для безопасности, ГОСТ Р МЭК 60987-2024 позволяет строить программу испытаний по схеме «параметр – функция – критерий приемки» [3], а ГОСТ Р МЭК 61888-2021 устанавливает основу контроля уставок аварийной защиты, что позволяет проверять цепочку: измерительный сигнал, затем обработка, после нее соответствие уставки и выполнение защитной функции [4].

Сопоставление опыта ввода энергоблоков проекта АЭС-2006 на трёх площадках выявляет как общие подходы, так и существенные различия в организации пусконаладки КИПиА (таблица).

Таблица

Сравнение практик ПНР КИПиА на энергоблоках проекта АЭС-2006

Параметр	НВОАЭС-2	ЛАЭС-2	Белорусская АЭС
Особенность ПНР	Опережающий ввод системы внутриреакторного контроля (СВРК) для получения исходных данных до физпуска	Доработка СВБУ ПОРТАЛ в ходе ПНР; отладка информационных функций в процессе комплексных испытаний	Комплексные интеграционные испытания систем безопасности (ТПТС-СБ) с расширенным объёмом проверок
Масштаб КИПиА	Базовая конфигурация проекта АЭС-2006	Аналогична НВОАЭС-2; доработки по результатам опыта НВОАЭС-2	Прототип ЛАЭС-2; дополнительные проверки по требованиям Республики Беларусь
Ключевой урок	Необходимость раннего ввода СВРК для подтверждения метрологических характеристик до физпуска	Важность отладки программно-технических средств в реальном цикле испытаний, а не автономно	Целесообразность расширенных интеграционных испытаний систем безопасности до загрузки топлива

Количественная оценка масштаба ПНР также подтверждает различия: переход от проекта В-320 к АЭС-2006 сопровождается ростом числа измерительных каналов с 6238 до 12081, защит – с 3686 до 11140, объёма испытаний – с 1638 до 2231 процедур [5]. На НВОАЭС-2 применён опережающий ввод системы внутриреакторного контроля, что позволило получить исходные метрологические данные до физического пуска реактора [5]. На ЛАЭС-2 в ходе ПНР выполнялась доработка СВБУ ПОРТАЛ – отладка информационных функций в реальном цикле испытаний, а не автономно [6]. Белорусская АЭС, как прототип ЛАЭС-2, потребовала расширенных интеграционных испытаний систем безопасности (ТПТС-СБ) [6]. Сопоставление показывает, что различия касаются трёх направлений: момента ввода измерительных систем, глубины интеграции аппаратных и программных средств, объёма интеграционных испытаний систем безопасности.

Сопоставлены практики ПНР КИПиА на трёх площадках АЭС-2006 и предложена трёхуровневая модель контроля: прибор, измерительный канал, функция системы. Наиболее значимым является переход от индивидуальной проверки прибора к функциональному подтверждению, поскольку именно на этом этапе устанавливается связь измерения с безопасностью энергоблока. Сопоставление нормативных требований [1–4] и опубликованного опыта пуска энергоблока проекта АЭС-2006 [5] показывает, что ни один из рассмотренных документов в отдельности не покрывает всю цепочку от поверки прибора до подтверждения защитной функции. Предложенная трёхуровневая модель объединяет разрозненные

требования в единую последовательность приемки, что и составляет практический вклад данной работы. Выявлено, что опыт НВОАЭС-2 по опережающему вводу СВРК не был в полном объёме тиражирован на последующих площадках, что увеличивает трудозатраты на этапе комплексной наладки.

Сравнительный анализ показал, что готовность КИПиА перед выходом на мощность целесообразно оценивать не по количеству выполненных операций, а по полноте подтверждения функции. Предложенная трёхуровневая модель (прибор – канал – функция) и выявленные различия между площадками могут быть использованы для оптимизации программ ПНР на строящихся энергоблоках. Перспективным направлением является разработка типовой методологии тиражирования опыта пусконаладки между проектами АЭС-2006.

Список литературы

1. СТО НОСТРОЙ 2.24.91–2013. Объекты использования атомной энергии. Пусконаладочные работы на системах и оборудовании при сооружении и вводе в эксплуатацию объектов использования атомной энергии. Основные требования и система контроля качества. – Москва: Национальное объединение строителей, 2013. – URL: https://meganorm.ru/Index2/1/4293773/4293773300.htm (дата обращения: 25.09.2026).
2. ГОСТ Р 70518–2022. Автоматизированные системы объектов использования атомной энергии. Метрологическое обеспечение. Основные положения: дата введения 2023-04-01. – Москва: Российский институт стандартизации, 2022. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200194507 (дата обращения: 25.09.2026).
3. ГОСТ Р МЭК 60987–2024. Контрольно-измерительные приборы и системы управления, важные для безопасности атомных станций. Требования к аппаратным средствам: дата введения 2024-11-01. – Москва: Российский институт стандартизации, 2024. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1306807749 (дата обращения: 25.09.2026).
4. ГОСТ Р МЭК 61888–2021. Уставки аварийной защиты атомных станций. Выбор и поддержание в заданных условиях: дата введения 2022-01-01. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200179152 (дата обращения: 25.09.2026).
5. Аркадов, Г. В. Опыт пусконаладочных работ на энергоблоке № 6 Нововоронежской АЭС-2 / Г. В. Аркадов, А. В. Матвеев, С. И. Махин // Глобальная ядерная безопасность. – 2021. – № 4(41). – С. 36–46. – EDN UXNVPP.
6. Акимов, Н. Н. Особенности пусконаладочных работ на Белорусской АЭС / Н. Н. Акимов, В. В. Бибиков, В. А. Кольцов, В. Н. Лотов // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2(88). – С. 5–11.

УДК 614.841.41

БЕЗОПАСНОСТЬ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ: ТЕРМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Кулагина Л.В., канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-4406-5060,
Савчиц Д.А.
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, РФ
klvation@gmail.com

Введение. В данной статье рассматривается проблема моделирования термического режима применительно к системам литий-ионных аккумуляторов (Li-ion). Отмечается, что для создания действенных подходов к моделированию тепловых свойств и управлению ими требуется провести дополнительные исследования [1], чтобы в итоге повысить безопасность и эксплуатационные характеристики батарей. Взаимосвязь между регулированием температуры в Li-ion аккумуляторных системах имеет решающее значение, поскольку в процессе работы этих систем накопления энергии неизбежно выделяется неконтролируемое тепло. Однако, в виду того, что теплота выделяется в результате экзотермической реакции, локализация аварийного возгорания может быть крайне сложным процессом [2].

Основная цель данной работы – продемонстрировать эффективность вычислительный среды COMSOL Multyphysics для задач термического моделирования Li-ion источника питания и подчеркнуть ключевую роль таких параметров, как сила тока и температура, в формировании тепловой динамики.

Основная часть. Растущий спрос и необходимость улучшения эксплуатационных характеристик **Li-ion** аккумуляторных систем повысили значимость решений, реализуемых средами математического моделирования (MATLAB, Mathcad, ANSYS, COMSOL Multiphysics). Тепловая модель, позволяющая прогнозировать тепловыделение в процессе заряда и разряда аккумуляторной батареи, является важным инструментом управления тепловыми характеристиками, эффективностью и сроком службы аккумуляторов. Влияние температуры на деградацию характеристик **Li-ion** аккумуляторов сказывается в ряде показателей: ухудшение параметров обусловлено, прежде всего, сложным взаимодействием материалов аккумулятора и протекающими химическими реакциями, температурные колебания способны изменять кинетику электрохимических реакций внутри структуры аккумулятора. Кроме того, температура существенно влияет на такие фундаментальные параметры, как ионная проводимость электролитов и электродов, последствия воздействия экстремальных температурных условий значительно сложнее тех, что наблюдаются при более умеренных температурных перепадах.

Температура окружающей среды, зависящая от сезонных изменений, погодных условий и климатических факторов, варьируется в зависимости от географического региона эксплуатации транспортного средства, эти колебания являются ключевым фактором, определяющим срок службы прибора. На «календарный срок службы», важный показатель долговечности, влияет динамическое взаимодействие между степенью заряженности и температурой окружающей среды. В регионах с жарким климатом аккумуляторы при хранении нередко теряют значительную часть ёмкости [2]. На рисунке 1 отображено распределение температуры в Li-ion аккумуляторной батарее: наибольшее вычисленное значение наблюдается в нижней части активного вещества, расположенной рядом с термически изолированным торцом. Следовательно, именно этот участок наиболее подвержен самовозгоранию.

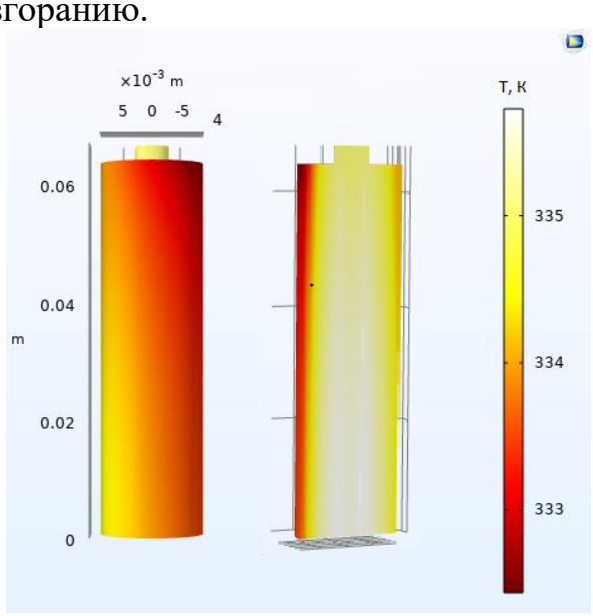


Рис. 1. Моделирование тепловых процессов в Li-ion аккумуляторе с использованием COMSOL Multyphysics

На рисунке 2 приведена зависимость температуры Li-ion батареи от нагрузки, за один цикл зарядки температура повышается в среднем примерно на 8 К, причём наибольший прирост (16 К) отмечается в первом цикле. При разрядке средний нагрев за цикл составляет около 5,5 К, а максимальный, равный 8 К, также приходится на первый цикл. Повышение температуры батареи при разряде связано с перемещением ионов лития в направлении, обратном их движению во время зарядки.

Заключение. В данном исследовании на ряде примеров продемонстрирована возможность моделирования и численных расчетов: от прогнозирования рабочих характеристик, анализа тепловых режимов и оценки безопасности до определения параметров и мониторинга состояния здоровья (степени износа) аккумулятора в программе для мультифизического моделирования COMSOL Multyphysics. Неравномерное распределение температуры в аккумуляторных блоках указывает на

необходимость создания оптимизированных систем управления тепловыми режимами; также очевидна необходимость дальнейших исследований для разработки эффективных методов моделирования и управления тепловыми характеристиками, что в конечном итоге позволит повысить безопасность, производительность и эффективность эксплуатации **Li-ion** аккумуляторных систем. Выводы, сделанные на основе методов термического анализа, могут быть использованы производителями аккумуляторов для совершенствования их конструкции, а исследователями для дальнейшего развития данной области [3, 4].

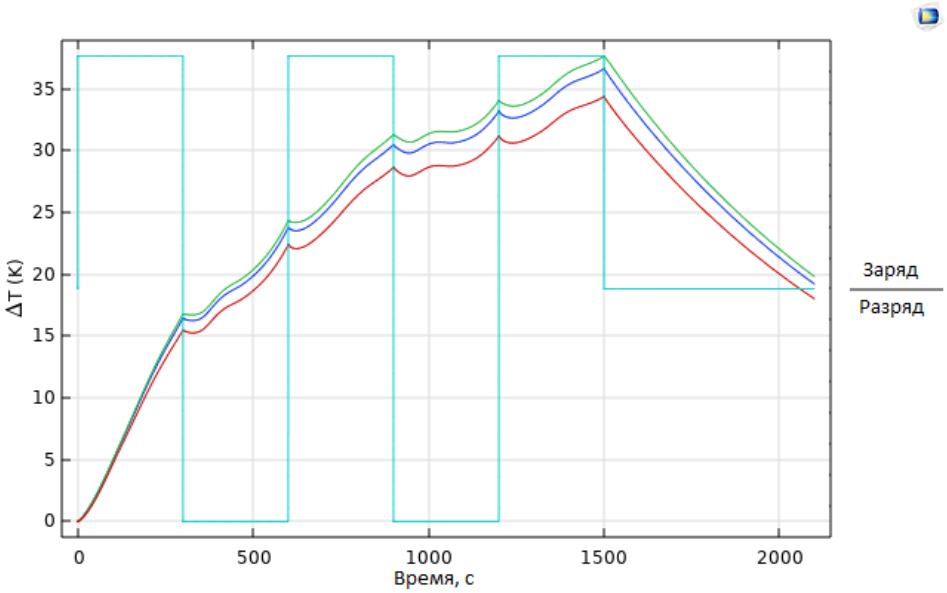


Рис. 2. Температура Li-ion аккумулятора при различных уровнях нагрузки

Список литературы

1. Кулагина, Т. А. Теоретические основы защиты окружающей среды / Т. А. Кулагина, Л. В. Кулагина. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. – 364 с. – ISBN 978-5-7638-3678-3. – EDN QYEVRM.
2. Кулагина, Л. В. Повышение безопасности литий-ионных аккумуляторных элементов / Л. В. Кулагина, М. М. Гафуров, Э. А. Шефер // Технологии техносферной безопасности. – 2025. – № 4(110). – С. 113-122. – DOI 10.25257/TTS.2025.4.110.113-122. – EDN AHCJRC.
3. Кулагина, Л. В. Научно-исследовательские проекты СФУ в области ликвидации ЧС, пожарной безопасности для территорий Енисейской Сибири / Л. В. Кулагина, Т. А. Кулагина // Безопасная Арктика-2025. – Москва: Академия государственной противопожарной службы, 2025. – С. 23-29. – EDN ALWNTP.
4. Кулагин,а Л. В. Подход к повышению надежности противопожарных технологий промышленного предприятия / Л. В. Кулагина, Э. А. Шефер // Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века. – Минск: Информационно-вычислительный центр Минфина Республики Беларусь, 2024. – С. 241-244. – DOI 10.46646/SAKH-2024-2-241-244. – EDN SOJANQ.

УДК 533.6.071.3

СТЕНД ПОВЕРКИ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИИ

Лебедев В.Н.,
Пометун Е.Д., канд. техн. наук, ORCID 0009-0008-4205-3297,
Табачук В.А.
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
v.lebedev@donnu.ru, e.pometun.fnpme@mail.ru

Введение. Скорость и температура воздуха являются основными нормируемыми параметрами по ГОСТ 30494-2011 в жилых и общественных помещениях [1]. Правила проектирования и эксплуатации систем вентиляции изложены в СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [2]. По ГОСТ 30494-2011, скорость движения воздуха нормируется в обслуживаемой зоне помещений. Скорость зависит от времени года и назначения помещения, причем оптимальный диапазон равен 0,15–0,2 (м/с), а максимальный диапазон: 0,15 – 0,3 (м/с). В производственных помещениях требования устанавливаются ГОСТ 12.1.005 и отраслевыми правилами [3]. Допустимые значения зависят от категории выполняемых работ и могут достигать 0,5 м/с.

Измерение температуры воздушного потока хорошо отработано и не вызывает технических сложностей, то для измерения скорости вентиляционных потоков широко распространенные методы такие как пневматические зонды и различного типа ротационные преобразователи (крыльчатки) не применимы. Для пневматических зондов (например, трубок Пито – Прандтля) рабочий диапазон, как правило, только начинается с 3–5 (м/с), а для крыльчаток с 0,5–1 (м/с). В результате основным для измерения скорости вентиляционных потоков является термоанемометрический метод, как правило, основанный на принципе постоянной температуры и оснащенный системой термокомпенсации [4].

Основная часть. Термоанемометры эффективно работают именно в необходимом диапазоне скоростей воздушных потоков, от 0,05 до 5 (м/с). Чувствительные первичные преобразователи, выполненные на основе высокостабильных NTC – термисторов и, особенно, платины обладают хорошей временной стабильностью. Однако такие датчики имеют низкую механическую прочность и подвержены загрязнениям. В результате, необходима периодическая поверка приборов, основанных на термоанемометрическом методе измерений. Поверка выполняется с помощью специализированных аэродинамических стендов, позволяющих создавать и стабильно поддерживать скорости воздушного потока от 0,05 м/с до 1 м/с. На кафедре ФНПМЭ им. И.Л. Повха ДонГУ разработана Специальная градуировочная установка «СГУ-1». Опыт эксплуатации СГУ-1 показал, что традиционная схема управления скоростью, основанная на изменении

напряжения питания коллекторного двигателя имеет два существенных недостатка [5]. Во-первых, частота оборотов вентилятора, соединенного с электродвигателем, зависит от напряжения питания и аэродинамической нагрузки. В результате, кроме стабилизации напряжения питания, необходима более сложная система стабилизации оборотов. Во-вторых, коллекторный двигатель, в зависимости от типа, имеет довольно значительное начальное напряжение, причем при минимальных оборотах стабильность оказывается низкой. Для перекрытия всего диапазона скоростей в конструкцию поверочной установки вводятся дополнительные каналы различного сечения. Точная установка скорости достигается путем параллельного включения нескольких каналов различного сечения – байпасов и их переключениемс помощью специальных клапанов.

В последнее время широкое распространение получили преобразователи частоты (частотные инверторы), позволяющие из бытовой сети ~220 В, 50 Гц сформировать стандартное трехфазное напряжение для питания двигателей переменного тока. Использование частотных инверторов позволяет решить сразу несколько задач. Установка частоты электропитания двигателя выполняется с помощью цифровых индикаторов с дискретностью 0,1 Гц. Эта частота задана внутренним высокостабильным опорным генератором. В частотных инверторах обороты асинхронного двигателя и, соответственно, вентилятора поддерживаются с помощью встроенной схемы: «векторного управления».

Использование асинхронного двигателя и частотного инвертора позволяет значительно упростить конструкцию аэродинамического стенда и улучшить его метрологические характеристики. На рисунке приведена зависимость между перепадом давления на измерительной диафрагме, расположенной в месте сужения канала, и частотой электропитания асинхронного двигателя.

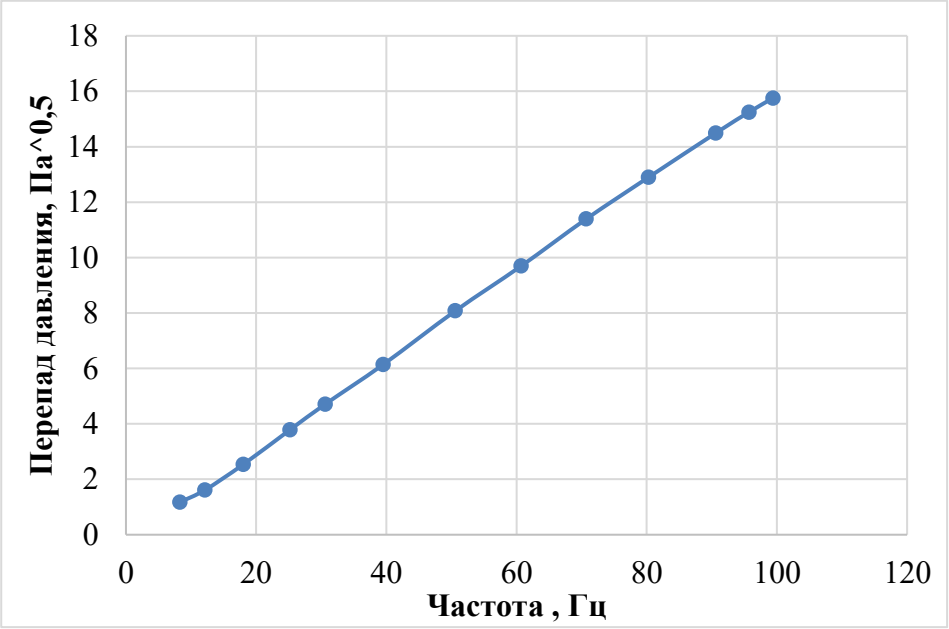


Рис. Зависимость перепада давления на измерительной диафрагме от частоты инвертора

При изменении сетевого напряжения в диапазоне 120-237 (В), изменение падения давления на измерительной диафрагме не регистрировалось.

Заключение. Аэродинамический стенд СГУ-1 для поверки приборов вытяжной вентиляции, позволяет задавать стабильные скорости в диапазоне от 1 м/с до 15 м/с. Векторное управление осуществляется без дополнительного датчика скорости оборотов ротора – по измерению токов и напряжений. Это упрощает конструкцию и снижает стоимость, а стабильность оборотов вентилятора подтверждается постоянством падения давления на измерительной диафрагме. Переход на асинхронный двигатель с частотным инвертором позволил отказаться от байпасных каналов, существенно упростив конструкцию стенда. Значительная часть конструкции стенда, включая вентилятор, была отпечатана на 3D принтере. Стенд собран из доступных материалов и может быть повторен в качестве учебного пособия в аэродинамических лабораториях.

Список литературы

1. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 июля 2012 г. № 191-ст: введен впервые: дата введения 2013-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 15 с.
2. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. № 921/пр : введен в действие 01.07.2021. – Москва: Минстрой России, 2020. – (Свод правил).
3. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.09.1988 № 3388: дата введения 1989-01-01: с Изменением № 1, принятым Постановлением Госстандарта России от 20.06.2000 № 159-ст, введенным в действие с 01.12.2000. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 49 с.
4. Лебедев, В. Н. Термокомпенсация выходного сигнала термоанемометра на основании уравнения теплового баланса / В. Н. Лебедев, Е. Д. Пометун, А. В. Васильева // Оригинальные исследования. – 2022. – Т. 12, № 5. – С. 406-412. – EDN OWAUUQ.
5. Методы и средства поверки измерителей скорости потоков жидкости и газа / Н. И. Болонов, С. М. Романчук, Е. М. Силенко [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 6-13. – EDN ZMKKEO.

УДК 628.3:504.4.054

ИЗУЧЕНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ СТОЧНЫХ ВОД КОКСОХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТОДАМИ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

Маркин В.В., канд. техн. наук, доц., ORCID 0009-0004-3031-7786,
Хомутянская А.В., ORCID 0009-0004-8314-4946,
Назарова М.А., Лебедь А.А.
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» –
филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ
a.v.homutyanskaya@donnasa.ru

Введение. Сточные воды (СВ) коксохимических предприятий (КХП) формируются при термической переработке каменного угля и представляют собой сложные многокомпонентные смеси одно- и многоатомных фенолов, цианидов, роданидов, аммиака, масел, смол и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [1]. Сложный состав коксовых стоков не позволяет оценить их опасность только с помощью физико-химического анализа. При физико-химическом анализе по отдельным компонентам не учитываются возможные эффекты суммации и синергизма загрязняющих веществ. Кроме того, токсическое воздействие некоторых загрязнений может быть более сильным, чем оно было принято при установлении их ПДК. Во всем мире для оценки качества очистки различных видов СВ и уровня их воздействия на биосферу все большее применение находят методы биотестирования.

Целью работы является анализ необходимости применения методов биотестирования для оценки качества очистки и биологической опасности сточных вод КХП.

Основная часть. В мировой практике для оценки опасности СВ методами биотестирования применяется широкий спектр тест-организмов: бактерии, водоросли, простейшие, ракообразные, рыбы и высшие растения. С их помощью оценивают острую и хроническую токсичность, эмбриотоксичность, генотоксичность, фитотоксичность, нейротоксичность, репродуктивную токсичность, а также ингибирование фотосинтеза и эстрогенную активность. Опубликованные данные по биотестированию СВ КХП позволяют утверждать, что данный вид стоков изначально обладает высокой биотоксичностью, которая зачастую остается повышенной по различным показателям и после очистки.

Например, методы оценки биотоксичности использовались для анализа опасности СВ на двух действующих КХП в КНР [2]. Опасность стоков по показателю выживаемости контролировали на планктонном ракообразном *Daphnia magna*, по острой токсичности, эмбриотоксичности

и генотоксичности (методом ДНК-комет) – на рыбках *Danio rerio*. Исходные СВ на данных КХП оказались чрезвычайно биотоксичными. Половина дафний погибала при разбавлении стоков даже до 1,5–2 %. После биологической очистки с использованием аноксидно-оксидного процесса и доочистки озонированием либо Фентон-окислением острая и эмбриональная токсичность практически исчезали, но генотоксичность сохранялась. Повышенную генотоксичность очищенных СВ авторы связывают с влиянием остаточных концентраций рефрактерных ПАУ и промежуточных продуктов деструкции загрязняющих веществ. Таким образом в работе показано, что даже при нормативной очистке по физико-химическим показателям в СВ КХП может сохраняться биологическая опасность для водных экосистем. В связи с этим, авторы сделали вывод, что в очищенных СВ КХП, кроме физико-химических показателей, необходимо нормировать и уровень биологической токсичности [2].

Наряду с действием на водных животных, токсичность СВ КХП проявляется и по отношению к водным растениям. Попадание загрязненных вод в почву и водоемы неизбежно затрагивает растительные сообщества. На одном из КХП в Польше оценивалась фитотоксичность стоков на трех стадиях обработки: после биологической очистки, фильтрации на песчаных фильтрах и обратного осмоса. Фитотоксичность оценивалась по прорастанию семян конских бобов *Vicia faba in vitro* в фитотронной камере на хлопковой матрице и питательной среде Мурасиге–Скуга [3]. После биологической очистки СВ подавляли прорастание семян на 90–98 % на хлопковой матрице и 92–100 % на матрице Мурасиге–Скуга. После фильтрации на песчаном слое ингибирование снижалось до 24–48 % и 14–54 % соответственно, что отвечает классу токсичных вод. И лишь мембранная очистка методом обратного осмоса позволила снизить эффект до 4–10 % на хлопковой матрице и до 2–12 % на матрице Мурасиге–Скуга, что соответствует уровню нетоксичных или слаботоксичных вод. Необходимо отметить, что, даже несмотря на обработку обратным осмосом, достичь полного устранения фитотоксичности не удалось.

Заключение. Из рассмотренного можно сделать три основных вывода:

1. Используемые в настоящее время технологии очистки сточных вод КХП не обеспечивают снижение их биологической токсичности до безопасных уровней, например, по таким показателям, как генотоксичность и фитотоксичность.

2. Для снижения биотоксичности сточных вод КХП до безопасных значений необходимо совершенствование технологий их очистки. Приоритет в этом направлении целесообразно отдать прежде всего методам биологической очистки, как наименее затратным, универсальным, безопасным и естественным.

3. С целью повышения эффективности экологического контроля качества очистки сточных вод КХП, кроме использования физико-химических показателей, необходимо внедрение системы нормирования по показателям биотоксичности на государственном уровне. Для этого требуется выполнить подробный анализ используемых в настоящее время методов биотестирования и научно обосновать группу методов, которые позволят оценить основные показатели биотоксичности стоков КХП: острой и хронической токсичности, генотоксичности, эмбриотоксичности, фитотоксичности, нейротоксичности и остальных.

Список литературы

1. Хомутянская, А. В. Анализ проблемы очистки сточных вод коксохимических предприятий / А. В. Хомутянская, В. В. Маркин // Донецкие чтения – 2025: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы X Международной научной конференции, посвященной 60-летию создания Донецкого научного центра, Донецк, 05–07 ноября 2025 года. – Донецк: Донецкий государственный университет, 2025. – С. 79-81. – EDN DSKXGJ.
2. Evaluation of the detoxification efficiencies of coking wastewater treated by combined anaerobic-anoxic-oxic (A^2O) and advanced oxidation process / C. Na, Y. Zhang, X. Quan [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2017. – Vol. 338. – P. 186–193. – DOI 10.1016/j.jhazmat.2017.05.037.
3. Smol, M. Influence of Integrated Membrane Treatment on the Phytotoxicity of Wastewater from the Coke Industry / M. Smol, D. Włóka, M. Włodarczyk-Makuła // Water Air Soil Pollut. – 2018. – Vol. 229. – P. 1-14. – DOI 10.1007/s11270-018-3794-1.

УДК 621.311.1

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СТРУКТУРЫ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ХЕРСОНСКОЙ ОБЛАСТИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Мельник О.Е., канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-7517-6815,
Перепеченый В.А., канд. техн. наук, доц., ORCID 0009-0008-1948-4291,
Перепечена С.С.
ФГБОУ ВО «Херсонский технический университет», г. Геническ, РФ
olgaemelnik@gmail.com, pervital1975@mail.ru, svetlanaperepe4ena@mail.ru

Введение. В условиях дефицита генерации электрической энергии (ЭЭ), роста тарифов на энергоносители агропромышленный комплекс нуждается в новых источниках электрической энергии, что особенно остро для Херсонской области – аграрного региона, где сельскохозяйственный потребитель формирует основную долю электропотребления. Сельские

электрические сети области протяжённые и разветвлены при малой передаваемой мощности [1]. Поэтому наиболее широкое внедрение здесь получают возобновляемые источники ЭЭ (ВИЭ) – ветровые (ВЭС) и фото (ФЭС) электрические станции. Объект исследования – сельские электрические сети 14 муниципальных округов левобережной части области.

Основная часть. Характеристика сельских электрических сетей региона. Магистральные сети 150 кВ и выше с апреля 2023 г. переданы организации, ответственной за ЕНЭС, распределительные обслуживает «Херсонэнерго» (филиал АО «Юго-Западная ЭСК»). Протяжённость воздушных линий (ВЛ) по трассе составляла 24 824/25 830 км, кабельных 35–0,4 кВ – 1 084,33 км, то есть более 96 % длины приходится на ВЛ. При удельной протяжённости около 0,9 км/км² нагрузка на единицу длины линии является низкой, а потери ЭЭ высокие [3]. Значительная часть ВЛ 0,4–10 кВ исчерпала расчётный ресурс.

Режимный фактор. Регион питается по радиальной схеме через смежную энергосистему; нарушения во внешней сети неоднократно приводили к одновременному обесточиванию всех округов (июнь–август 2026 г.). Поэтому рационально размещённая распределённая генерация важна и в режимном смысле: она способна формировать локальные зоны питания ответственных потребителей [4].

Потенциал ВИЭ. На территории области фиксируется около 240 солнечных дней в году, среднегодовая солнечная инсоляция – около 1 250 кВт·ч/м². На побережьях Чёрного и Азовского морей и в Присивашье среднегодовая скорость ветра – 5,0–6,5 м/с на высоте флюгера (7,0–8,0 м/с на высоте ступицы 100–120 м); здесь расположены основные ВЭС: Сивашская ВЭС (Чаплынский МО, 245,7 МВт), Новотроицкая (72,6 МВт), Оверьяновская (68,4 МВт).

Утрата регулировочной мощности и орошения. До 2023 г. балансирование неравномерной генерации ВИЭ юга в значительной мере обеспечивала Каховская ГЭС мощностью 334,8 МВт со среднегодовой выработкой 1,5–2 млрд кВт·ч. После разрушения плотины 6 июня 2023 г., регион потерял манёвренный источник вблизи узлов концентрации ВИЭ, а обезвоживание Каховского магистрального и Северо-Крымского каналов вывело из оборота основную часть орошаемых площадей (до 2022 г. – 31 система общей площадью около 584 тыс. га). Исчезла крупная дневная нагрузка, потреблявшая генерацию ФЭС на месте, что увеличило реверсивные перетоки в сетях 10 кВ и потери ЭЭ.

Балансовый метод оценки. Для оценки эффективности сельских электрических сетей применяется балансовый метод с учётом генерации ВИЭ и потерь на её передачу:

$$W_1 + \Sigma W_{ВИЭi} = W_п + \Delta W(x, W_{ВИЭ}),$$

где W_1 – ЭЭ, поступающая в сельские электрические сети от центра питания; $W_{ВИЭi}$ – ЭЭ, генерируемая i-м источником; $W_п$ – полезно

отпущенная потребителям ЭЭ; ΔW – потери на передачу, зависящие от вектора x номеров узлов подключения ВИЭ. Задача поиска минимума такого выражения баланса – $\Delta W(x, W_{ВИЭ}) \rightarrow \min$ при ограничениях $U_{min} \leq U_j \leq U_{max}$, по токовой загрузке элементов и мощности короткого замыкания – недетерминирована из-за непостоянства прихода первичного энергоносителя [5]. Количественно: КИУМ составляет 0,13–0,15 для ФЭС и 0,30–0,35 для ВЭС Присивашья, а среднеквадратическое отклонение суточной выработки достигает 40–60 % среднего.

Региональные факторы снижения неопределённости. Первичные энергоносители здесь взаимодополняемы: максимум ветровой генерации приходится на ноябрь–март, солнечной – на май–август. Совместное подключение ФЭС и ВЭС в одном узле выравнивает суммарный график генерации и уменьшает дисперсию баланса [6]. Кроме того, график насосных станций орошения совпадает с графиком ФЭС, что позволяет потреблять ЭЭ локально.

Практические следствия. Для сельских электрических сетей региона целесообразно подключать ВИЭ в узлах, наиболее удалённых от центра питания, – там, где фиксируются наибольшие потери напряжения в ВЛ 10 кВ. При превышении генерации над локальной нагрузкой возникает реверсивный переток, поэтому для каждого узла существует оптимальная мощность источника. Эффект усиливают перевод сетей на 20 кВ [7], самонесущие изолированные провода и накопители ЭЭ.

Заключение. Поиск оптимальных мест подключения ВИЭ требует оценки энергоэффективности структуры сельских электрических сетей, то есть решения сложной недетерминированной оптимизационной задачи. Для Херсонской области она особенно актуальна с учётом высокого потенциала ВИЭ, протяжённости и износа сетей, радиального внешнего питания, а также утраты Каховской ГЭС и системы орошения. В целевую функцию задачи целесообразно включать взаимодополняемость солнечной и ветровой генерации и совпадение графиков орошения и ФЭС.

Список литературы

1. Будзко, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / И. А. Будзко, Т. Б. Лещинская, В. И. Сукманов. – Москва: Колос, 2000. – 536 с. – Текст: непосредственный.
2. Белов, С. И. Микрогенерация и микросети в сельской местности для эффективной трансформации электроэнергетики / С. И. Белов, Н. Ф. Дрига, Д. А. Коняев // С.О.К. – 2025. – № 3. – С. 58–71. – Текст: непосредственный
3. Буторин, В. А. К вопросу снижения технических потерь электроэнергии в сельских районных электрических сетях / В. А. Буторин, Е. Н. Клычков // Вестник МЭИ. – 2026. – № 3. – С. 54–64. – Текст: непосредственный. – DOI 10.24160/1993-6982-2026-3-54-64.
4. Варганова, А. В. Оценка надежности внешнего электроснабжения сетей 6–10 кВ с источниками распределенной генерации / А. В. Варганова, А. С. Ирихов // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3 (52). – С. 22–28. – Текст: непосредственный. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-22-28.

5. Обоскалов, В. П. Учет корреляционной составляющей при оценке нагрузочных потерь мощности и электроэнергии в ЭЭС с распределенной генерацией при вероятностно определенных нагрузках / В. П. Обоскалов. // Электричество. – 2026. – № 9. – С. 17–25. – Текст: непосредственный. – DOI 10.24160/0013-5380-2026-9-17-25.
6. Шерьязов, С. К. Ветроэлектрическая станция в системе распределённой генерации / С. К. Шерьязов // С.О.К. – 2018. – № 10. – С. 90–93. – Текст: непосредственный.
7. Исмагилов, Ш. Г. Целесообразность перевода распределительных электрических сетей на напряжение 20/0,4 кВ / Ш. Г. Исмагилов, И. И. Миняров // NovaInfo. – 2019. – № 105. – С. 12–14. – Текст: электронный. – URL: https://novainfo.ru/article/16990 (дата обращения: 29.09.2026).

УДК 631.4:504.3.054

ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ СОДЕРЖАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА

Никишина И.А., ORCID 0009-0005-4598-0561
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
г. Алчевск, ЛНР, РФ
nik1.ir@yandex.ru

Введение. Проблема загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами является одним из наиболее острых вызовов для устойчивого развития современных городов. В Российской Федерации, несмотря на общее снижение валовых выбросов в последние десятилетия, пылевые концентрации в промышленных центрах и городах систематически превышают гигиенические нормативы.

Выбор мероприятий по снижению пылевой нагрузки осложняется многокомпонентностью источников: транспортный комплекс, промышленные предприятия, ситуативные и сезонные источники (строительная пыль, абразивный износ дорожного полотна и деталей машин, ветровая эрозия почв). Немаловажную роль играют аэрозоли различной плотности в атмосфере. Для промышленных городов, к которым относится г. Алчевск (Луганская Народная Республика) по причине наличия металлургического комплекса ООО «Южный горнометаллургический комбинат», не теряет актуальности задача выбора мероприятий по снижению содержания мелкодисперсной пыли в атмосферном воздухе [1].

Цель работы – анализ возможных мероприятий по снижению содержания мелкодисперсной пыли в атмосферном воздухе промышленного города Алчевска.

Основная часть. Практические решения по снижению концентраций PM2.5 и PM10, как наиболее часто встречаемых фракций в общем объеме пыли, должны соответствовать требованиям в рамках федераль-

ного проекта «Чистый воздух» (национальный проект «Экология»), а также учитывать локальные особенности территорий (планы улиц, объемы транспортных потоков, наличие постоянных источников загрязнений). В условиях г. Алчевска предлагается выполнить классификацию подходов к выбору мероприятий на основании углубленной оценки закономерностей изменения содержания мелкодисперсной пыли (таблица).

Таблица

Сравнительный анализ подходов к выбору мероприятий по снижению мелкодисперсной пыли

Подход	Суть методологии	Ключевые авторы и источники	Примеры мероприятий
Технократический (инженерный)	Фокус на установке газо- и пылеулавливающего оборудования на организованных источниках выбросов.	Манжилевская С.Е. [2]	Электрофильтры, рукавные фильтры, скрубберы, герметизация узлов пересыпки сыпучих материалов.
Дисперсионно-ориентированный	Выбор мер на основе моделирования рассеивания с акцентом на источники, дающие максимальный вклад в приземную концентрацию в жилой зоне, а не в валовый выброс.	Невмержицкий Н.В. [3]	Изменение высоты труб, установка защитных экранов, изменение розы ветров за счет новой застройки.
Транспортно-планировочный	Снижение выбросов через управление мобильностью и конфигурацией улично-дорожной сети.	Паращук Е. М. [4]	Развитие электротранспорта, строительство бессветофорных эстакад, использование шумо- и пылезащитных экранов.
Градостроительно-экологический	Использование морфологии застройки и биоты для рассеивания и поглощения пыли.	Башевая Т. С. [5]	Создание санитарно-защитных разрывов, коридоров проветривания, пылезащитное вертикальное озеленение фасадов, пылеулавливающие фитофильтры.
Нормативно-административный	Установление жестких временных и пространственных ограничений на деятельность, связанной с образованием пыли как источника загрязнения окружающей среды.	Общие принципы экологического законодательства РФ [6]	Запрет на движение транспорта ниже класса Евро-5 в центре города, мораторий на земляные работы в сухие ветреные дни, квотирование выбросов.

Анализ современного опыта исследований показывает, что изолированное применение одного подхода не позволит достичь желаемого результата. Технократический подход эффективен для точечных промышленных источников, но имеет свои ограничения при диффузных выбросах транспорта и строительства. Транспортно-планировочные меры требуют десятилетий для полной трансформации городской среды. Наиболее прогрессивным является дисперсионно-ориентированный подход. Он позволяет обосновать мероприятия, которые приведут к наибольшему эффекту как для здоровья населения, так и улучшению общего состояния городской застройки.

Заключение. Проведение мероприятий по снижению содержания мелкодисперсной пыли в промышленном городе должно происходить системно и включать передовой опыт решения подобных вопросов. Эффективность моделей управления городской средой, позволяющих минимизировать заболеваемость населения и увеличить привлекательность территории, неразрывно связано с реализацией федерального проекта «Чистый воздух» и локальных комплексных планов, а также жестком ранжировании мер на основе моделирования поведения скоплений пыли и зонирования источников загрязнений с последующим устранением их негативного влияния.

Список литературы

1. Федорова, В. С. Дорожная пыль как негативный фактор загрязнения окружающей среды / В. С. Федорова // Экологический вестник Донбасса. – 2025. – № 15. – С. 27–36. – EDN: OGRVMT.
2. Манжилевская, С. Е. Оценка негативного воздействия мелкодисперсной пыли на городскую территорию от точечной застройки / С. Е. Манжилевская // Современные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 2 (55). – С. 116–125.
3. Невмержицкий, Н. В. Результаты измерений чрезвычайно опасного загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами на автомобильных дорогах / Н. В. Невмержицкий, О. В. Ложкина, В. А. Цветков // Измерения в современном мире – 2015. Сборник научных трудов 5-ой Всероссийской научно-практической конференции. – 2015. – С. 161–171.
4. Паращук, Е. М. Алгоритм адаптивного регулирования дорожного движения / Е. М. Паращук, Н. Г. Горшкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 155–164.
5. Башевая, Т. С. Плотность городской застройки, как определяющий фактор рассеивания пыли в условиях индустриального региона / Т. С. Башевая, А. В. Хомутянская // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2024. – №5. – С. 73–79. – DOI: 10.71536/vd.2024.5c169.9. – EDN: FGLLFG.
6. Постановление Правительства РФ от 09.12.2020 № 2055 «Об утверждении Положения о предельно допустимых выбросах, временно разрешённых выбросах, предельно допустимых нормативах физических воздействий на атмосферный воздух» – Текст: электронный // Правительство Российской Федерации. – 2020. – URL: https://base.garant.ru/75053246/?ysclid=mup549t3k621924171 (дата обращения: 01.10.2026).

УДК 628.477.6:661.43:614.8

ТЕХНОСФЕРНЫЙ АСПЕКТ И РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДА САМОСПАСАТЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В ГИПОХЛОРИТНЫХ СИСТЕМАХ

Плотников Д.А., канд. техн. наук, доц., ORCID 0009-0007-3024-509,
Антонов Д.В., ORCID 0009-0002-3135-017X
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» –
филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ
d.a.plotnikov@donnasa.ru, antonov.d.v-zizosm-9a@donnasa.ru

Введение. Безопасность объектов водоснабжения и водоподготовки приобретает особое значение при авариях и чрезвычайных ситуациях. Один из факторов риска – применение хлора: при повреждении оборудования или нарушении герметичности емкостей возможен выброс токсичного газа и формирование опасной зоны, что создает угрозу для персонала и населения [1]. Снизить этот риск позволяет переход от хранения значительных объемов газообразного хлора к гипохлоритным системам. Такой подход меняет характер опасности: необходимость держать на объекте большие запасы токсичного газа отпадает. Однако гипохлориты не становятся от этого безопасными – их растворы обладают окислительными и коррозионными свойствами и требуют соответствующих условий хранения и обращения [1].

Отдельного внимания заслуживает обращение с отходами самоспасателей на химически связанном кислороде. После окончания срока хранения или эксплуатации регенеративный продукт переходит в отход, но сохраняет значительный химический потенциал: в составе ОКЧ-3 содержится 85-88 % пероксида калия. Это позволяет рассматривать такой отход не только как объект, требующий безопасного хранения и утилизации, но и как потенциальный источник вторичного калийсодержащего сырья [2]. Использование химически активного отхода для получения соединений калия, применяемых в гипохлоритных системах, объединяет две задачи техносферной безопасности: сокращение количества химически активных отходов и снижение зависимости от хранения газообразного хлора на объектах водоподготовки.

Цель исследования. Оценить возможность использования отхода регенеративного продукта самоспасателей как вторичного калийсодержащего сырья для формирования гипохлоритных систем с позиции техносферной безопасности.

Основная часть. В традиционных схемах обеззараживания воды газообразный хлор эффективен, но его применение связано с необходимостью хранения, транспортирования и подачи токсичного газа.

Поэтому интерес представляют технологии, в которых хлор образуется непосредственно в процессе эксплуатации или используется в виде гипохлоритов [1]. Переход к гипохлоритным системам, однако, не означает полного устранения химической опасности – меняется прежде всего характер потенциальной аварии: вместо сжиженного газообразного хлора применяется форма реагента, менее опасная с точки зрения образования токсичного газового облака. Требования к контролю концентрации, герметичности оборудования, условиям хранения и исключению контакта гипохлоритов с несовместимыми веществами сохраняются.

Один из возможных источников калия для таких систем – отход регенеративного продукта самоспасателей. Его перспективность определяется химическим составом исходного продукта: для ОКЧ-3 содержание пероксида калия составляет 85-88 %, присутствуют также оксид кальция и небольшое количество других компонентов [2]. В процессе хранения и эксплуатации состав отхода меняется: пероксид калия при взаимодействии с влагой переходит в гидроксид калия, а при дальнейшем контакте с диоксидом углерода – в карбонат калия. Конкретная схема переработки поэтому должна учитывать фактическое состояние отхода.

Если в отходе преобладают соединения калия в гидроксидной форме, его перерабатывают с последующим использованием гидроксида калия для получения гипохлорита калия. В качестве расчетной основы принимается реакция взаимодействия хлора с гидроксидом калия. Здесь только часть калия переходит в целевой гипохлорит, остальная образует хлорид калия. Такой вариант позволяет задействовать химический потенциал отхода, но отличается ограниченным выходом целевого продукта. Для отхода с высокой степенью карбонизации возможно другое направление – использование карбоната калия с предварительным или непосредственным переводом его в соединения, пригодные для формирования гипохлорита. Это направление следует рассматривать как расчетную возможность, требующую экспериментальной проверки: фактическое соотношение форм калия в отходе разного состояния заранее определить по исходному составу регенеративного продукта нельзя.

Расчетный ресурсный потенциал отхода оценивается исходя из содержания в нем пероксида калия. В 1 кг ОКЧ-3 при содержании 85-88 % KO_2 содержится около 0,467-0,484 кг калия, что соответствует 0,671-0,694 кг KOH в пересчете на гидроксид калия. Теоретические количества гипохлорита калия приведены в таблице. Приведенные значения характеризуют стехиометрический ресурсный потенциал, а не фактический выход продукта: реальный выход будет зависеть от химического состояния отхода, степени превращения соединений калия, состава примесей и параметров процесса. Расчеты следует воспринимать как предварительную оценку возможности вовлечения отхода во вторичный оборот.

Таблица

Расчетный ресурсный потенциал калия отхода регенеративного продукта

Расчетный параметр	Результат на 1 кг отхода регенеративного продукта
Содержание KO_2 в отходе	0,850-0,880 кг
Калий в 1 кг отхода	0,467-0,484 кг
KOH-эквивалент	0,671-0,694 кг
Теоретический выход KClO, гидроксидное направление	0,541-0,560 кг
Теоретический выход KClO, карбонатное направление	1,083-1,121 кг
Теоретически образующаяся масса KCl Сопутствующий продукт реакции KOH с Cl_2	0,446-0,461 кг

С позиции техносферной безопасности предложенный подход интересен по нескольким направлениям. Химически активный отход рассматривается как потенциальное вторичное сырье – это уменьшает объем материала, направляемого на традиционное обращение. Содержащийся в отходе калий используется для получения целевого продукта, что снижает потребность в первичном сырье. Применение гипохлоритных систем в водоподготовке потенциально позволяет отказаться от хранения значительных запасов газообразного хлора на объекте. В результате оказываются взаимосвязаны две самостоятельные задачи безопасности: обращение с химически активным отходом и снижение рисков, связанных с газообразным хлором.

Заключение. Проведенная оценка показывает, что отход регенеративного продукта самоспасателей на химически связанном кислороде может рассматриваться как потенциальный источник вторичного калийсодержащего сырья для формирования гипохлоритных систем. Для 1 кг отхода с содержанием 85-88 % пероксида калия расчетное содержание калия составляет 0,467-0,484 кг, KOH в эквиваленте – 0,671-0,694 кг. Теоретический ресурс гипохлорита калия составляет 0,541-0,560 кг для гидроксидного направления и до 1,083-1,121 кг для карбонатного варианта.

Данный подход одновременно способствует вовлечению химически активного отхода во вторичный оборот и снижению необходимости хранения газообразного хлора на объектах водоподготовки.

Список литературы

1. Фесенко, Л. Н. Сравнительный анализ экологической и промышленной безопасности электрохимических технологий получения хлорсодержащих продуктов для целей дезинфекции воды / Л. Н. Фесенко, А. Ю. Черкесов, С. И. Игнатенко // Строитель Донбасса. – 2018. – Вып. 4. – С. 8-15. – ISSN 2617-1848. – Текст: электронный. – URL: https://strdon.donnasa.ru/?p=812 (дата обращения: 07.09.2026).
2. Высоцкий, С. П. Использование отходов самоспасателей на химически связанном кислороде для снижения карбонатной жесткости шахтной воды / С. П. Высоцкий, Д. А. Плотников, В. В. Мамаев – текст: непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – №7 (239). – С. 172–181. – DOI 10.18799/24131830/2021/07/3281.

УДК 544.6.076.3:621.3.035.9

ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ВАХ И БАЛАНС ПОТЕРЬ ТОТЭ С GDC

Плотников Д.М., ORCID 0009-0009-8860-5867,
Базин Д.А., ORCID 0009-0003-0651-0714
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, РФ
plotdmshad32@gmail.com, rezort12@mail.ru

Аннотация. В работе представлена одномерная изотермическая математическая модель твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ) с электролитом из диоксида церия, легированного гадолинием (GDC). Модель учитывает уравнение Нернста, активационные, омические и концентрационные потери. Проанализировано влияние температуры (650–800°C) и толщины электролита (5–20 мкм) на вольтамперную характеристику и удельную мощность. Показано, что снижение толщины электролита с 10 до 5 мкм, увеличивает пиковую мощность на ~10,5 % при 750°C. Доминирующим типом потерь остается активационная поляризация анода.

Введение. Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) обеспечивают прямое преобразование химической энергии в электрическую с высоким КПД [1]. Традиционные ТОТЭ на основе YSZ требуют температур 800–1000°C, что ускоряет деградацию компонентов. Переход в среднетемпературный диапазон (600–800°C) возможен при использовании электролитов на основе GDC, обладающих высокой ионной проводимостью при сниженных температурах [2].

Цель работы – математическое моделирование изотермической ВАХ ТОТЭ с GDC и анализ баланса потерь для оптимизации толщины электролита.

Методика. Объект исследования – анодно-поддерживаемая планарная ячейка. Базовая PEN-структура включает три слоя: 1) несущий анод из кермета Ni-YSZ толщиной 500 мкм; 2) тонкопленочный электролит из GDC (базовая толщина 10 мкм); 3) функциональный катод из LSCF толщиной 50 мкм. В рамках параметрического анализа толщина электролита варьировалась от 5 до 20 мкм, рабочая температура – от 650 до 800 °C. Состав газовых смесей на границах электродов принят постоянным: на аноде p_{H2}=0,95 атм, p_{H2O}=0,05 атм; на катоде p_{O2}=0,21 атм. Кинетические параметры электродов (обменные плотности тока, энергии активации) и предельная плотность тока (j_{lim}=2,5 А/см^2) выбраны на основе литературных данных для соответствующих материалов [2, 3].

Модель. Рабочее напряжение ячейки V рассчитывается как разность термодинамической электродвижущей силы (ЭДС) и суммы поляризационных потерь:

$$V = E_{\text{Нернст}} - \eta_{\text{акт}}^{\text{а}} - \eta_{\text{акт}}^{\text{к}} - \eta_{\text{ом}} - \eta_{\text{конц}} \,. \qquad (1)$$

ЭДС определяется уравнением Нернста с линейной температурной поправкой, определяемой энтропией реакции.

Активационные потери на аноде и катоде описываются уравнением Батлера-Фольмера в форме гиперболического арксинуса:

$$\eta_{\text{акт}} = \frac{2RT}{nF}\operatorname{arcsinh}\left(\frac{j}{2j_0}\right), \quad (2)$$

где обменная плотность тока j_0 зависит от температуры по закону Аррениуса. Омические потери учитывают только сопротивление электролита GDC толщиной δ_e:

$$\eta_{\text{ом}} = j\frac{\delta_e}{\sigma_{GDC}(T)}. \quad (3)$$

Ионная проводимость GDC описывается аррениусовской зависимостью с энергией активации 0,64 эВ [3].

Концентрационные потери лимитируются предельной плотностью тока j_{lim}=2,5 А/см^2:

$$\eta_{\text{конц}} = -\frac{RT}{nF}\ln\left(1-\frac{j}{j_{lim}}\right). \quad (4)$$

Результаты и обсуждение. Моделирование проводилось для анодно-поддерживаемой ячейки в диапазоне температур 650–800°C при базовой толщине электролита 10 мкм. С ростом температуры от 650 до 800°C ЭДС незначительно снижается (с 1,127 до 1,106 В) в соответствии с термодинамикой реакции, однако кинетика электродов и ионная проводимость GDC существенно улучшаются. Это приводит к росту напряжения при 1 А/см² с 0,569 В до 0,910 В. Пиковая удельная мощность возрастает почти в 2,3 раза: с 0,657 Вт/см² до 1,497 Вт/см², при этом оптимум смещается в область более высоких токов (рис. 1).

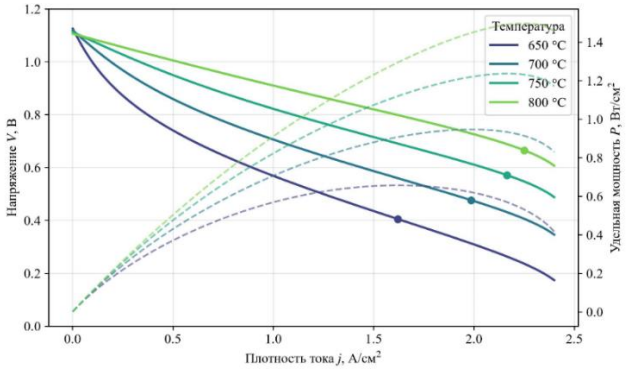


Рис. 1. Влияние температуры на ВАХ и мощностная характеристика ТОТЭ, при δ_e=10 мкм

Снижение толщины электролита минимизирует омические потери. При фиксированной температуре 750°C (рис. 2) максимальная мощность возрастает с 1,009 Вт/см^2 (20 мкм) до 1,24 Вт/см^2 (10 мкм) и 1,37 Вт/см^2 (5 мкм). Переход от 10 к 5 мкм дает прирост мощности на ~10,5 %. Дальнейшее истончение (<5 мкм) нецелесообразно из-за риска сквозной пористости и роста токов утечки через электролит из-за собственной электронной проводимости GDC.

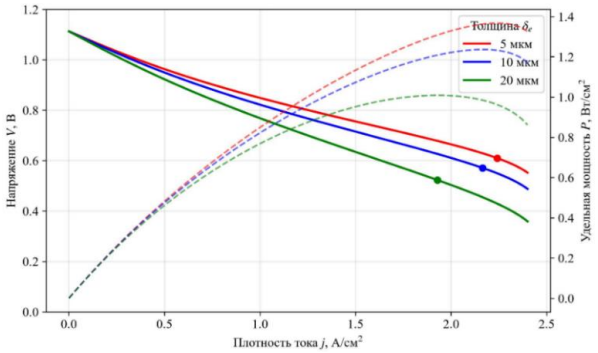


Рис. 2. Влияние толщины электролита GDC на ВАХ T = 750°C

Для понимания физики процессов был рассчитан детальный баланс потерь напряжения при базовой температуре 750°C и толщине электролита 10 мкм (табл.)

Таблица

Баланс потерь напряжения (T=750 °C, δ_e=10 мкм)

j, А/см²	ЭДС, В	$\eta^{а}_{акт}$, В	$\eta^{к}_{акт}$, В	$\eta_{ом}$, В	$\eta_{конц}$, В	V, В
0,5	1,113	0,079	0,048	0,027	0,010	0,950
1,0	1,113	0,129	0,086	0,054	0,023	0,822
1,5	1,113	0,162	0,115	0,081	0,040	0,715

Заключение. Разработанная модель показала, что рост температуры с 650 до 800°C увеличивает мощность в 2,3 раза преимущественно за счет ускорения электродной кинетики. Оптимизация толщины электролита до 5 мкм дает дополнительный прирост мощности на 10, 5%. Анализ баланса потерь выявил, что при 1,0 А/см² и 750°C наибольший вклад в падение напряжения вносит активационная поляризация анода (0,129 В), что указывает на необходимость оптимизации микроструктуры именно анодного слоя.

Список литературы

1. Галлямов А. Н. Обзор современных функциональных материалов, используемых в твердооксидных топливных элементах, работающих на водородном топливе / А. Н. Галлямов и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2022. – №. 4. – С. 38-62. – DOI 10.15593/2224-9400/2022.4.04
2. Pramuanjaroenkij A. Mathematical analysis of planar solid oxide fuel cells / A. Pramuanjaroenkij, S. Kakaç, X. Y. Zhou // International journal of hydrogen energy. – 2008. – Т. 33. – №. 10. – С. 2547-2565. –10.1016/j.ijhydene.2008.02.043
3. Leah R. T. Modelling of cells, stacks and systems based around metal-supported planar IT-SOFC cells with CGO electrolytes operating at 500–600°C / R. T. Leah, N. P. Brandon, P. Aguiar // Journal of Power Sources. – 2005. – Vol. 145, No. 2. – P. 336–352. – 10.1016/j.jpowsour.2004.12.067

УДК 544.6.076.3:621.3.035.9

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ТОТЭ С GDC ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ

Плотников Д.М., ORCID 0009-0009-8860-5867,
Базин Д.А., ORCID 0009-0003-0651-0714
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, РФ
plotdmshad32@gmail.com, rezort12@mail.ru

Аннотация. На сопряжённой одномерной модели ТОТЭ исследован перегрев PEN-структуры при токах до 2.2 А/см^2 и двух режимах охлаждения. Показано, что при номинальном теплоотводе перегрев не превышает 18 К, а при ухудшении охлаждения растёт до 48 К. Поле температуры однородно, лимитирующая стадия – внешний теплоотвод.

Введение. ТОТЭ являются одной из самых перспективных технологий в сфере энергетики, позволяя использовать энергию топлива без прямого сжигания. Но основным недостатком таких элементов является высокая рабочая температура порядка 1000 °С, ограничивающая требования к материалу конструкции.

Применение электролита из диоксида церия, легированного гадолинием (GDC), позволяет снизить рабочую температуру ТОТЭ до 600–800°С. Однако тепловой режим по-прежнему определяет надёжность элемента: локальный перегрев ускоряет деградацию и создаёт термические напряжения [1–3].

Цель работы – исследование перегрева внутренней структуры ТОТЭ и его зависимости от плотности тока и условий охлаждения.

Модель и допущения. Рассматривается стационарное 1D уравнение теплопроводности с объёмными источниками по толщине планарной PEN-структуры: анод Ni-YSZ 500 мкм, электролит GDC 10 мкм, катод LSCF 50 мкм (теплопроводности k = 5,0; 2,5; 2,5 Вт/(м·К)). Уравнение решается методом контрольных объёмов на сетке 170 узлов с гармоническим осреднением k на стыках слоёв и допуском итераций 10^{-7} К. Источниками тепла служат необратимые поляризационные потери, распределённые по слоям (омические, активационные и концентрационные).

Перенапряжения η и проводимость $\sigma_{GDC}(T)$ вычисляются электрохимическим блоком (уравнения Нернста, Батлера–Фольмера, Ома и диффузионных потерь [5]) и сопрягаются с теплопроводностью через объёмно-среднюю температуру: итерации продолжаются до согласования электрического и теплового решений. На обеих внешних поверхностях задано граничное условие III рода с эффективным коэффициентом теплоотдачи $h_э$=304 Вт/(м^2·К) (линеаризованное излучение) при температуре газа 750°С. Варианту «слабое охлаждение» соответствует

h=100 Вт/(м^2·К). Обратимая (энтропийная) теплота не учитывается, поэтому оценка перегрева является верхней (консервативной в сторону завышения температуры)

Прочие допущения: стационарность, равномерность тока по площади и отсутствие градиентов в плоскости ячейки, постоянство k, идеальный контакт слоёв, отсутствие деградации.

Проверка правдоподобия чисел. Адекватность модели подтверждена строгим выполнением энергетического баланса, сеточной сходимостью (удвоение узлов изменяет ΔT менее чем на 0,01 К) и совпадением с аналитическими оценками. В частности, расчётный максимальный перегрев отличается от формулы для симметричного охлаждения $\Delta T_{max} \approx \frac{j(E-V)}{(2h_{эф})}$ менее чем на 1 %, а внутренний градиент согласуется с законом Фурье для анодного слоя.

Результаты. Основные результаты представлены в табл. и на рис. При номинальном охлаждении перегрев растёт квазиквадратично: от 0,2 К (j=0,2 А/см^2) до 18 К (j=2,2А/см^2). Ухудшение теплоотвода (h=100 Вт/(м^2·К)) увеличивает ΔT_{max}почти втрое, достигая 48 К (рис., б). Температурное поле по толщине PEN практически изотермично: внутренний градиент не превышает 0,22 К, а максимум температуры локализован у границы анод–электролит (рис., а). Сопряжённый учёт температуры важен при j≥1А/см^2: самоподогрев снижает поляризационные потери и повышает рабочее напряжение на 0,038 В (≈ 6 %) при 2 А/см^2 по сравнению с изотермической моделью.

Таблица

Характеристики при номинальном и ослабленном охлаждении

j	$\Delta T_{ном}$ (h=304)	ΔT_{h100}	$V_{сопр}$	$V_{изот}$
0,2	0,23	0,69	1,0439	1,0438
0,5	1,34	3,94	0,9517	0,9498
1	4,66	13,19	0,8316	0,8221
1,5	9,33	25,41	0,7367	0,7153
2	15,34	40,34	0,6485	0,6108
2,2	18,36	47,59	0,6074	0,5617

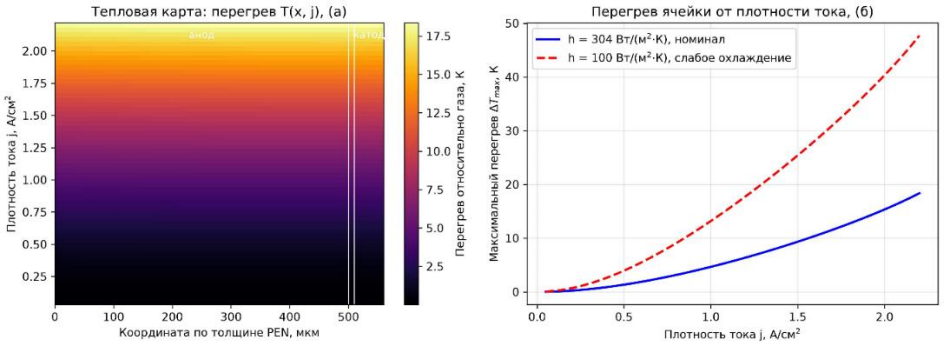


Рис. (а) Поле перегрева ΔT(x, j) по толщине структуры (белые линии – границы слоёв); (б) Зависимость максимального перегрева от плотности тока

Обсуждение. Термосопротивление внутренней структуры ($\Sigma \frac{d_i}{k_i}$≈1,2·10^{-4} м^2·К/Вт) на порядок меньше внешнего ($\frac{1}{2h_э}$≈1,6·10^{-3} м^2·К/Вт), что подтверждается малым числом Био (Bi≈0,03≪1). Следовательно, лимитирующей стадией является внешний теплообмен, а не кондуктивный перенос внутри ячейки. При слабом охлаждении проявляется отрицательная обратная связь: рост температуры снижает перенапряжения, поэтому реальный перегрев (40,3 К при j=2 А/см^2) оказывается ниже формальной линейной оценки (46,6 К).

Учёт обратимой (энтропийной) теплоты TΔS (эндотермический эффект) снизил бы величины ΔT вплоть до 50-70 % в зависимости от плотности тока. Тем не менее, сквозные градиенты по толщине остаются безопасными для керамики. Критические термические напряжения в реальных ТОТЭ возникают преимущественно вдоль газовых каналов, что требует привлечения 2D/3D моделей.

Заключение. Перегрев PEN-структуры растёт квазиквадратично с током: при номинальном охлаждении он не превышает 18 К, а при ослабленном (h=100 Вт/(м^2·К)) достигает 48 К. Температурное поле по толщине практически однородно (градиент ≤0,22 К). Лимитирующей стадией является внешний теплообмен (Bi≈0,03), поэтому риск растрескивания из-за сквозных градиентов пренебрежим. Сопряжённый учёт самоподогрева повышает расчётное напряжение на 6 % при 2 А/см², что подтверждает необходимость совместного решения электрохимической и тепловой задач. Модель учитывает только необратимые поляризационные потери; обратимый (энтропийный) тепловой эффект реакции (≈ 0,24 В в эквиваленте по току при 750 °C) не включён, поэтому полученные значения ΔT характеризуют перегрев, обусловленный поляризационными потерями.

Список литературы

1. Singhal S. C. Advances in solid oxide fuel cell technology / S. C. Singhal // Solid State Ionics. – 2000. – Vol. 135, No. 1–4. – P. 305–313. – DOI 10.1016/S0167-2738(00)00452-5.
2. Minh N. Q. Ceramic fuel cells / N. Q. Minh // Journal of the American Ceramic Society. – 1993. – Vol. 76, No. 3. – P. 563–588. – DOI 10.1111/j.1151-2916.1993.tb03645.x.
3. Steele B. C. H. Materials for fuel-cell technologies / B. C. H. Steele, A. Heinzel // Nature. – 2001. – Vol. 414, No. 6861. – P. 345–352. – DOI 10.1038/35104620.
4. Pramuanjaroenkij A. Mathematical analysis of planar solid oxide fuel cells / A. Pramuanjaroenkij, S. Kakaç, X. Y. Zhou // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – Vol. 33, No. 10. – P. 2547–2565. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2008.02.043.
5. Chan S. H. A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness / S. H. Chan, K. A. Khor, Z. T. Xia // Journal of Power Sources. – 2001. – Vol. 93, No. 1–2. – P. 130–140. – DOI 10.1016/S0378-7753(00)00556-5.

УДК 004.9:621.39

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ LPWAN-ПРОТОКОЛОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рябовол М.И., ORCID 0009-0007-0927-0647,
Тюрин А.Ю., ORCID 0009-0002-3478-0896,
Номерчук А.Я., ORCID 0009-0007-5548-1824
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, РФ
mriabovol@sfedu.ru, atiurin@sfedu.ru, aynomerchuk@sfedu.ru

Технологии Интернета вещей (IoT) повсеместно внедряется в сферы человеческой деятельности: от сложных технологических промышленных решений до систем умного дома. К примерам реализации этой концепции относятся системы мониторинга и анализа показателей параметров окружающей среды, в частности, водных объектов. Такое решение предполагает использование совокупности узлов-датчиков, установленных на оптимально дальнем расстоянии между собой с целью покрытия наибольшей площади водного объекта [1].

Важной задачей проектирования проектов подобного плана является то, как узлы будут передавать данные между собой и на общий сервер для последующей обработки. Для организации сети, решающей проблемы экологического мониторинга, все большую популярность набирает технология беспроводных сетей LPWAN (Low-power Wide-area Network) из-за ее низкой мощности и дальнего радиуса действия [2, 3].

Протоколы, используемые в таких сетях, делятся на две основные категории: не сотовые, работающие в нелицензируемых частотных диапазонах и сотовые, которые в свою очередь использую лицензируемые частоты, зависящие от сотовых операторов и тарифов, предлагаемых ими. Основными представителями этих двух групп являются протоколы Lora WAN и Sigfox, использующие нелицензируемые частоты, и сотовые протоколы NB-IoT и LTE-M.

Безоговорочным лидером LPWAN сетей, занимающим к 2025 году около 40 % рынка, является протокол LoRaWAN. Массовое использование этой технологии обуславливается высокой устойчивостью к помехам и способности работать при низких уровнях сигнала, что обеспечивается особым способом модуляции сигнала LoRa, которая использует CSS (Chirp Spread Spectrum) модуляцию. К особенностям протокола относится и способность автоматически оптимизировать энергопотребление и качество связи [3, 4].

В случаях, когда автономность является главным фактором при построении IoT-систем, предпочтение отдают Sigfox. Протокол представляет собой технологию сверх узкополосной связи (Ultra Narrow

Band, UNB), использующую полосу канала шириной всего 100 Гц. В отличие от LoRaWAN рассматриваемая технология использует два метода модуляции: DBPSK (кодируется не сам бит, а его изменение) для восходящей связи и GFSK (с использованием фильтра Гаусса) для нисходящей. Для достижения высокой энергоэффективности протокол вводит ограничения интенсивности трафика до 140 сообщений в сутки, размер которых не превышает 12 байт на пакет [5].

Совершенно иной подход предлагает стандарт NB-IoT, который работает на базе существующих вышек сотовой связи LTE. Благодаря этому сеть не нужно строить с нуля – ее можно очень быстро развернуть и масштабировать. NB-IoT использует полосу пропускания 180 кГц и модуляцию QPSK, при которой два бита передаваемой информации кодируются одним символом, обеспечивая скорость передачи данных до 250 Кбит/с в восходящем канале и до 20 Кбит/с в нисходящем.

Для IoT-систем с требованиями к мобильности был разработан LTE-M (LTE Cat-M1) на базе стандарта LTE. В отличие от других LPWAN-решений, LTE-M поддерживает полнодуплексный режим передачи данных со скоростью до 1 Мбит/с, что позволяет передавать не только телеметрию, но и голосовые данные.

Ниже представлены сравнительные таблицы сфер применения (таблица 1) и характеристик LPWAN-протоколов (таблица 2).

Таблица 1

Сферы применения LPWAN-протоколов

Сфера применения	Тип LPWAN-протоколов			
	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
Умные счетчики	отлично	хорошо	отлично	хорошо
Мониторинг окружающей среды	отлично	отлично	хорошо	хорошо
Трекинг транспорта	хорошо	удовлетво-рительно	отлично	отлично
Сельское хозяйство	отлично	отлично	хорошо	хорошо
Умные города	отлично	хорошо	отлично	отлично

Выбор оптимального LPWAN-протокола требует тщательного анализа технических требований, экономических факторов и стратегических соображений. Следует понимать, что каждый протокол имеет свои особенности, преимущества и недостатки, и выбор правильного решения может повлиять на эффективность системы.

Для системы экологического мониторинга водных объектов целесообразнее всего использовать протокол LoRaWAN. Как и другие стандарты LPWAN LoRaWAN обеспечивает дальнюю связь при низком энергопотреблении, но позволяет развернуть собственную сеть без зависимости от сотового оператора, что в отличие от сотовых решений

предлагает независимую карту покрытия. Относительно Sigfox он гибче и не сильно ограничен по обмену сообщениями между узлами.

Таблица 2

Характеристики LPWAN-протоколов

Характеристика	Тип LPWAN-протоколов			
	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
Тип сети	не сотовая	не сотовая	сотовая	сотовая
Частотный диапазон	863-870 МГц (EU)	868 МГц (EU)	700-900 МГц	700-2100 МГц
Полоса канала	125/250 кГц	100 Гц	180 кГц	1.08 МГц
Модуляция	CSS (LoRa)	DBPSK/GFSK	QPSK	QPSK/16QAM
Мощность передатчика	до 25 мВт	до 25 мВт	до 200 мВт	до 200 мВт
Скорость передачи данных	0.3-50 Кбит/с	до 600 бит/с	до 250 Кбит/с	до 1 Мбит/с
Дальность связи (город / загород)	2-5 км/ 15-20 км	3-10 км/ 30-50 км	1-10 км/ до 35 км	1-10 км/ до 35 км
Срок автоном-ной работы	более 10 лет	более 10 лет	более 10 лет	более 10 лет

Список литературы

1. Тюрин, А. Ю. Проектирование систем экологического мониторинга водных объектов на основе сенсорных сетей / А. Ю. Тюрин, М. И. Рябовол, А. Я. Номерчук // Инженерия сегодня. Проблемы, тенденции, перспективы: Материалы Всероссийской научно-практической интернет-конференции преподавателей, молодых ученых и студентов, Донецк, 16–18 февраля 2026 года. – Донецк: Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского, 2026. – С. 293-297. – EDN MAWIKL.
2. Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, Fernand Meyer A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment // ICT Express. – 2019. – №5. – С. 1-7.
3. Заргарян, Е. В. Проектирование городских распределенных сетей экологического мониторинга / Е. В. Заргарян, А. Я. Номерчук // Инновационные траектории современного города. – Москва: ООО «Актуальность.РФ», 2026. – С. 268-284. – EDN HWPTSV.
4. Таблица протоколов IoT 2025 [Электронный ресурс] // Inner Engineering. – URL: https://inner.su/articles/tablitsa-protokolov-iot-2025-lorawan-sigfox-nb-iot-sravnenie-dalnost (дата обращения: 09.09.2026)
5. Mroue M. LPWAN Technologies in Smart Cities: A Comparative Analysis of LoRa, Sigfox, and LTE-M / M. Mroue, A. Ramadan, A. Nasser [et al.]// Information System Design: Communication Networks and IoT. – 2024. – №2. – С. 219–231.

УДК 004.413.4

НЕОБХОДИМОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ В ДОШКОЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ

Савченко Т.С., ORCID 0009-0009-0020-1172,
Кравченко М.В., канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0009-0008-6606-2294
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» –
филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ
tatyana.sawchenko@mail.ru, m.v.kravchenko@donnasa.ru

Дошкольные образовательные учреждения (ДОУ) являются социально значимыми объектами, где работа с детьми 1–7 лет предъявляет особые требования к безопасности. Специфика трудовых процессов, таких как, психолого-педагогическое взаимодействие, присмотр и уход за детьми, хозяйственно-бытовое обслуживание, обусловливает необходимость комплексной оценки профессиональных и экологических рисков. Профессиональные риски связаны с условиями труда работников, а экологические – с воздействием учреждения на окружающую среду и безопасностью природной среды для детей и персонала.

Работа по охране труда в ДОУ определяется Трудовым кодексом РФ от 30.12.2001 №197 – ФЗ, Федеральным законом от 28.12.2013 №426 – ФЗ «О специальной оценке условий труда», нормативно-правовыми актами [1-4] и регулируется государственными стандартами безопасности труда (ССБТ), строительными нормативами и правилами (СНиП) [5-7]. Работодатель несет ответственность за обеспечение безопасных условий труда (ст. 212 ТК РФ). Специальная оценка условий труда (СОУТ должна проводиться не реже 1 раза в 5 лет.

Профессиональный риск – это вероятность причинения вреда здоровью работника при исполнении трудовых обязанностей [4]. В ДОУ к таким рискам относятся опасности, связанные с трудовой деятельностью персонала: воспитателей, медицинских работников, поваров, технического персонала и других сотрудников.

Рассмотрим этапы оценки профессиональных рисков:

1. Выявление опасностей. Во-первых, используют результаты специальной оценки условий труда и производственного контроля, в которых указаны вредные и опасные производственные факторы. Во-вторых, проводится опрос и анкетирование работников (возможно проведение семинаров). Цель – уточнить потенциальные источники травм и проверить знание сотрудниками инструкций по охране труда, расположение аптечек, средств пожаротушения и др. [2, 3].

2. Оценка уровней рисков. Применяют качественные, количественные и смешанные методы оценки. В РФ хорошо апробирован количест-

венный метод Файна – Кинни. Рассчитанный риск классифицируют как малый, умеренный, значительный, высокий или сверхвысокий [4].

3. Снижение уровней рисков. На основе результатов такой оценки намечают план и разрабатывают мероприятия для снижения высоких рисков. Как правило, рекомендуют: исключить опасную работу, заменить опасную работу на менее опасную, использовать дополнительные средства индивидуальной и коллективной защиты, провести ремонт или замену оборудования, эффективнее использовать административные меры (ограничение времени воздействия опасностей) [4].

Особенности оценки рисков в условиях ДОУ:

– необходимость учёта работы сотрудников не только в помещениях, но и на территории учреждения (например, рабочий по обслуживанию зданий, воспитатели занимаются с детьми на спортивной площадке) [4];

– важность контроля за соблюдением инструкций по охране труда, так как работники могут выполнять обязанности в разных местах;

– необходимость внеплановой оценки рисков при обновлении и модернизации оборудования, изменении технологических процессов или после несчастных случаев [3].

В методе Файна – Кинни количественно оценивают уровень профессионального риска путём умножения трёх показателей: вероятности возникновения опасности, подверженности работника воздействию опасности и тяжести последствий.

Расчёт индекса профессионального риска (ИПР) выполняют так:

$$ИПР = Вр \times Пд \times Пс, \quad (1)$$

где: Вр – вероятность реализации опасности, баллы; Пд – подверженность работника воздействию опасности, баллы; Пс – тяжесть последствий, баллы [4].

Рекомендуемые шкалы оценки показателей в формуле (1) и их интерпретация приведены в [4].

Далее разрабатываются меры по снижению риска, а затем проводится его повторная оценка.

Экологические риски в ДОУ связаны с воздействием деятельности учреждения на окружающую среду или с негативными экологическими факторами, влияющими на здоровье детей и персонала. Прежде всего, проблема связана с качеством воздуха и воды.

Опасности для персонала и воспитанников в ДОУ: несоответствие уровней запылённости, загазованности воздуха, температуры, влажности, освещённости, шума санитарным нормам [5-7]; использование материалов, выделяющих вредные вещества (например, фенол из мебели); наличие патогенных микроорганизмов; образование отходов (в том числе потенциально опасных, например, ртутных ламп).

Оценка экологических рисков должна включать: мониторинг состояния окружающей среды на территории ДОУ и в помещениях;

проверку соответствия учреждения санитарным правилам; контроль за обращением с отходами. Если в ДОУ образуются отходы I–IV классов опасности, требуется оформление паспортов отходов и, при необходимости, постановка на государственный учёт; анализ качества питьевой воды и воздуха в помещениях; проверку используемых строительных и отделочных материалов на соответствие экологическим стандартам.

В ДОУ профессиональные и экологические риски тесно связаны. Например, использование вредных химических веществ для уборки может создавать, как опасность для здоровья работников (профессиональный риск), так и ухудшать качество воздуха в помещениях (экологический риск).

И поэтому необходим комплексный подход к оценке и снижению профессиональных и экологических рисков в дошкольных учреждениях.

Список литературы

1. Постановление Правительства РФ от 24.12.2021 №2464 «О порядке обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда» // Собрание законодательства РФ. – 2022. – №1 (часть II). – Ст. 123.
2. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 №772н «Об утверждении основных требований к порядку разработки и содержанию правил и инструкций по охране труда, разрабатываемых работодателем» // Официальный интернет портал правовой информации. – URL: http://pravo.gov.ru/ (дата обращения: 15.02.2026). – Текст: электронный.
3. Приказ Минтруда России от 20.04.2022 №223н «Об утверждении Положения об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях…» // Официальный интернет портал правовой информации. – URL: http://pravo.gov.ru/ (дата обращения: 15.02.2026). – Текст: электронный.
4. Методические рекомендации по оценке профессиональных рисков в дошкольной образовательной организации (утв. Исполкомом Профсоюза работников народного образования и науки РФ от 25.12.2020 №5 11) // Официальный сайт Профсоюза. URL: http://edunion.ru/ (дата обращения: 15.02.2026). – Текст: электронный.
5. СанПиН 2.4.1.3049 13 «Санитарно эпидемиологические требования к устройству, содержанию и организации режима работы дошкольных образовательных организаций» (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 15.05.2013 №26) // Российская газета. – 2013. – № 151. – 10 июля.
6. СН 2.2.4/2.1.8.562 96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31.10.1996 №36) // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 1997. – №5.
7. СанПиН 2.4.3648 20 «Санитарно эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодёжи» (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2020 № 28) // Официальный интернет портал правовой информации. – URL: http://pravo.gov.ru/ (дата обращения: 15.02.2026). – Текст: электронный.

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОВ

Садовая И.В., канд. хим. наук, с. н. с. ORCID 0000-0001-6976-3290,
Алехов Ю.А., ORCID 0009-0007-5859-4939,
Аленин В.Г., ORCID 0009-0003-6256-1268
ФГБНУ «НИИ «Реактивэлектрон», г. Донецк, РФ
sadovaya@bk.ru

Введение. Фильтровальные материалы, которые используются для отделения твердых частиц от газов, находят широкое применение в различных областях промышленности. В связи с этим к ним предъявляются высокие требования по задерживающей и пропускной способности, термо- и химической стойкости. Использование фильтров на основе металлокерамики отвечает требованиям по всем таким показателям. Металлокерамические фильтры лучше задерживают мелкие частицы, чем металлические сетки и фильтровальные ткани, благодаря волнообразному и многослойному размещению лабиринтных пор в теле фильтрующего элемента. Они выдерживают более высокое давление и колебания температуры по сравнению с керамическими. Вместе с тем металлокерамические фильтры более прочны и эластичны, обладают достаточным электросопротивлением для предотвращения образования в процессе фильтрации электростатических зарядов.

Основная часть. Газодинамические характеристики металлокерамических фильтроэлементов определяли с учетом требований ГОСТ Р 50554-93 [1] на разработанной нами установке, схема которой представлена на рис. 1.

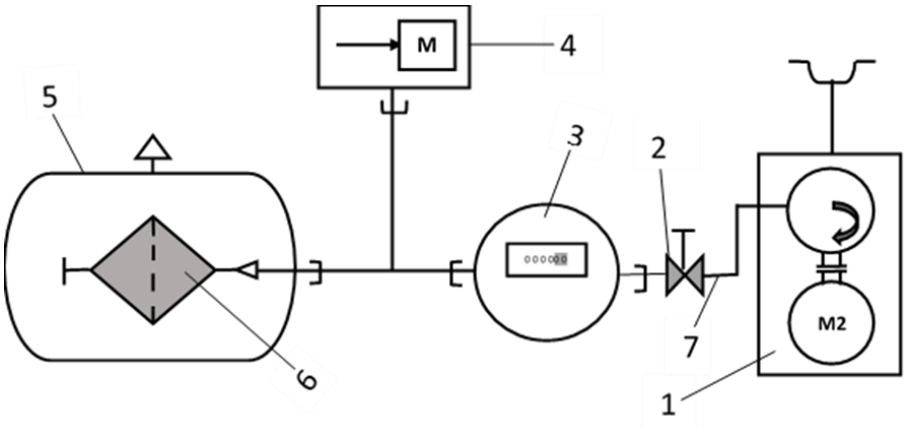


Рис. 1. Схема установки для определения газодинамических характеристик металлокерамических фильтроэлементов: 1 – компрессор Rocker 440; 2 – кран шаровой; 3 – счетчик газа ВК G2.5; 4 – напоромер НМП 52-м3; 5 – металлический корпус; 6 – металлокерамический фильтроэлемент; 7 – дюритовые трубки

Для исследований использовали металлокерамические фильтроэлементы Ni-Al системы, полученные нами оригинальным СВС методом в поле центробежных сил.

Скорость прохождения потока воздуха через фильтроэлемент определяли согласно [1] следующим образом: с помощью компрессора (1) через вентиль (2) под различным давлением подавался чистый атмосферный воздух на испытуемый фильтроэлемент (6). Время прохождения воздуха фиксировали с помощью секундомера, а объем замеряли счетчиком газа (3). Давление до фильтроэлемента измеряли с помощью напоромера (4), давление после фильтроэлемента соответствовало атмосферному. Перепад давления воздуха Δp между входом и выходом у фильтроэлемента во время опытов выдерживали на уровне 0,6, 1, 1,6, 2 и 2,6 кПа. При каждом значении Δp определяли скорость потока воздуха U, прошедшего через фильтроэлемент. По экспериментальным данным строили зависимости (1) – (3) (рис. 2) и (4) – (6) (рис. 3) скорости прохождения потока воздуха через фильтроэлемент от перепада давления.

$$U = (0.19 \pm 0.02) + (1.3 \pm 0.1)10^{-4}\Delta p, \quad (1)$$
$$r = 0.989,\ s = 0.017,\ n = 5;$$
$$U = (0.17 \pm 0.01) + (1.12 \pm 0.07)10^{-4}\Delta p, \quad (2)$$
$$r = 0.994,\ s = 0.012,\ n = 5;$$
$$U = (0.15 \pm 0.02) + (1.1 \pm 0.1)10^{-4}\Delta p, \quad (3)$$
$$r = 0.985,\ s = 0.017,\ n = 5.$$

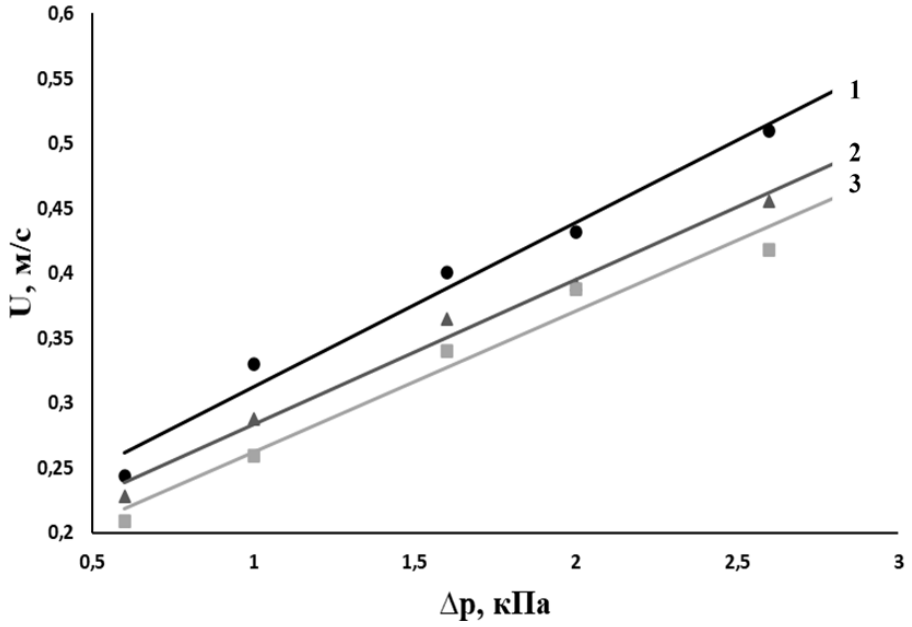


Рис. 2. Зависимость скорости прохождения потока воздуха через фильтроэлемент (32 масс.% Al и 68 масс.% Ni) с толщиной стенки 12 мм от перепада давления: 1 – пористость 63%; 2 – пористость 60%; 3 – пористость 58%

$$U = (0.48 \pm 0.04) + (3.1 \pm 0.2)10^{-4}\Delta p, \quad (4)$$
$$r = 0.993,\ s = 0.032,\ n = 5;$$

$$U = (0.26 \pm 0.02) + (1.5 \pm 0.1)10^{-4}\Delta p, \quad (5)$$
$$r = 0.989,\ s = 0.020,\ n = 5;$$
$$U = (0.17 \pm 0.01) + (1.12 \pm 0.07)10^{-4}\Delta p, \quad (6)$$
$$r = 0.994,\ s = 0.012,\ n = 5.$$

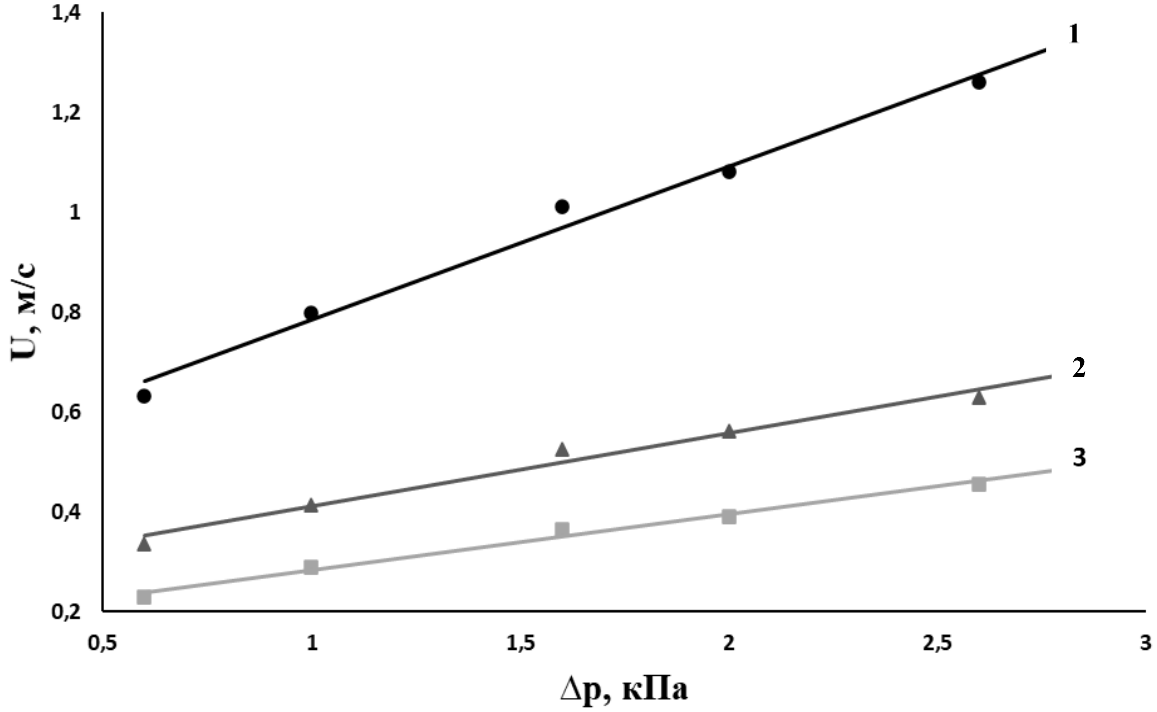


Рис. 3. Зависимость скорости прохождения потока воздуха через фильтроэлемент (32 масс.% Al и 68 масс.% Ni) с пористостью 60% от перепада давления: 1 – толщина стенки 4 мм; 2 – толщина стенки 8 мм; 3 – толщина стенки 12 мм

Как видно из уравнений (1)–(3) (рис. 2) и (4)–(6) (рис. 3) уменьшение пористости и увеличение толщины стенки фильтроэлемента приводит к уменьшению скорости прохождения через него потока воздуха.

Заключение. В ходе проделанной работы на разработанной установке проведены исследования газодинамических характеристик металлокерамических фильтроэлементов Ni-Al системы, полученных СВС методом в поле центробежных сил. Установлено, что с уменьшением пористости и увеличением толщины стенки фильтроэлемента, скорость прохождения потока воздуха через него уменьшается.

Список литературы

1. ГОСТ Р 50554-93. Промышленная чистота. Фильтры и фильтрующие элементы. Методы испытаний: утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 20.04.93 N 110: дата введения 1994-01-01. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200025912 (дата обращения: 08.09.2026). – Текст: электронный.

УДК 628.31

ОБОСНОВАНИЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ГИГИЕНИЧЕСКИХ НОРМАТИВОВ ПДС ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В СТОЧНЫЕ ВОДЫ СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Сердюк А.И., д-р хим. наук, проф., ORCID 0009-0009-2893-5725,
Афанасьев Н.Д.
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» –
филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ
a.i.serdyuk@donnasa.ru

Введение. В современном мире вопросы экологической безопасности становятся все более актуальными. Устойчивое развитие общества невозможно без учета экологических аспектов, особенно в таких отраслях, как строительная. Строительно-монтажные предприятия, выполняя свои функции, генерируют значительное количество сточных вод, которые могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду [1]. Очистка сточных вод является важным этапом в процессе минимизации этого воздействия, и поэтому повышение экологической безопасности данного процесса становится приоритетной задачей [2].

Основная часть. Рассматриваемое структурное подразделение «Иловайское строительно-монтажное эксплуатационное управление» Железные дороги Новороссии (ИСМЭУ) обеспечивает строительство и ремонт отраслевых зданий и сооружений, выполнение прочих монтажных работ, а также подачу питьевой и технической воды железнодорожным предприятиям, их инфраструктурам и населению этих поселков.

Целью выполнения этой работы являлось определение соответствия экологическим нормам концентраций загрязняющих веществ с очищенными промышленными и хозбытовыми сточными водами после очистных сооружений ст. Иловайск, сбрасываемыми в реки Грузская приток реки Кальмиус.

Структура ИСМЭУ включает следующие цеха и участки: цехи водоснабжения, столярный, инструментальный, гараж, отделы эксплуатации и главного механика и административный аппарат. Промплощадка размещается в г. Иловайске ДНР. На балансе предприятия находятся котельные, общежития, а также очистные сооружения хозбытовых сточных вод станции Иловайск.

Очистные сооружения состоят из последовательного набора очистных сооружений следующего состава: мусорозадерживающих решеток, песколовок, первичных отстойников, аэротенков, вторичных отстойников, блока обеззараживания.

Сточная вода до поступления на первую ступень очистки пропускается через решетки с ручной очисткой и далее, проходя по всему

тракту набора очистных сооружений, механически и биологически очищается от взвешенных веществ и органических загрязнений, обеззараживается на конечном этапе в контактных резервуарах (рисунок). Из них очищенная и обеззараженная вода сбрасывается в балку Заячья – левый приток реки Грузская бассейна реки Кальмиус. Источником питания реки являются талые, дождевые и грунтовые воды. Река с притоками испытывает сильную антропогенную нагрузку. В нее поступают большое количество хозбытовых, промышленных и шахтных вод, которые оказывают значительное влияние на гидрологический и гидрохимический режим реки. Вследствие высокой антропогенной нагрузки река практически утратила способность к самоочищению.

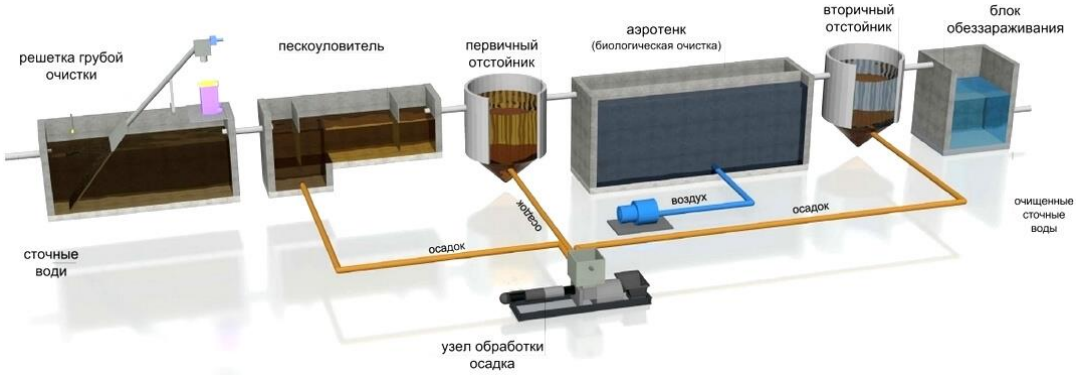


Рис. Схема очистных сооружений на ИСМЭУ

Фактический объем хозбытовых сточных вод, прошедших через очистные сооружения и сброшенных в реку Грузскую, согласно отчету по форме 2-ТП (водхоз) составил 1007.1 тыс. м^3 (2022 г.).

Контроль качества сточных вод осуществляет измерительная химико-бактериологическая лаборатория Иловайского СМЭУ. Среднегодовые показатели качества сточных вод на входе в очистные сооружения ст. Иловайск Иловайского строительно-монтажного эксплуатационного управления и на выходе из них, на сбросе очищенных стоков в балку Заячья и качество воды балки Заячья в контрольных створах приведены в таблице.

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что очистные сооружения ИСМЭУ очищают воду от органических загрязнений и взвешенных веществ до проектных показателей для биологических очистных сооружений полного биологического цикла очистки. Как средние показатели за три последних года, так и среднегодовые по каждому из них, в основном не превышают приведенных ниже предельно – допустимых концентраций для коммунально-бытовых целей (ПДК$_{кб}$). Исключение составляют нитраты, концентрация которых составляет около 66 г/м^3 на выходе из очистных сооружений (превышение в 1,5 раза). Превышение также наблюдается по минерализации (в 1.6 раза) и нефтепродуктам (в 3 раза).

Таблица

Концентрации ингредиентов в балке Заячья до и после сброса и соответствие их $ПДК_{кб}$

№ п/п	Наименование	Концентрация ингредиентов, г/м^3		Качество стока балки Заячья в месте сброса сточных вод, г/м^3		ПДКкб, г/м^3
		До очистки	После очистки	До сброса	После сброса	
1	Взвешенные вещества	211,5	14,76	14,4	12,0	0,75
2	Азот аммонийный	23,6	1,16	0,159	0,11	2
3	Нитриты	1,68	0,131	0,08	0,05	3,3
4	Нитраты	61,4	69,2	19,3	66,4	45
5	$БПК_5$	84,7	7,28	3,93	3,08	4,5
6	Минерализация	1478	1489	1848	1559	1000
7	Хлориды	264,3	281,6	186	189	350
8	Фосфаты	6,6	2.9	3,29	2,86	3,5
9	Нефтепродукты	4,76	0,28	0,89	0.31	0,1
10	Сульфаты	481	479,4	779	542	500
11	СПАВ	0,654	0,07	0,087	0,072	0,5
12	Железо общее	0,35	0,1	0,113	0,075	0,3
13	ХПК	159	24,0	14,03	11,0	30

Заключение. В результате проделанной работы установлено, что в воду выделяется 13 наименований загрязняющих веществ. Основной вклад в загрязнение вносят нитраты, хлориды, железо общее, органические и взвешенные вещества. Для достижения предельно-допустимого сброса необходимо выполнить водоохранные мероприятия по сокращению сбросов.

Список литературы

1. Бракович И. С. Инженерная экология: учебное пособие / И. С. Бракович, И. М. Золотарева, С. П. Кундас [и др.]; под редакцией Б. М. Хрусталева. – Минск: Вышэйшая школа, 2020. – 224 с. – ISBN 978-985-06-3258-6. – Текст: электронный // Образовательная платформа IPR CMAPT: [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/books/119983/details (дата обращения: 11.09.2026). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
2. Реховская, Е. О. Экологическая безопасность производства (по отраслям). В 2 частях. Ч. 1: учебное пособие / Е. О. Реховская, И. Ю. Нагибина. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. – 132 с. – ISBN 978-5-8149-3545-8, 978-5-8149-3546-5 (ч. 1). – Текст: электронный // Образовательная платформа IPR CMAPT: [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/books/131241/details (дата обращения: 27.09.2026). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

УДК 504.064.4

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА УТИЛЬНЫХ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Сердюк А.И., д-р хим. наук, проф., ORCID 0009-0009-2893-5725,
Беляев В.Н.
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» –
филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ
a.i.serdyuk@donnasa.ru

Введение. Отработанные свинцово-кислотные аккумуляторы являются одним из наиболее значимых источников вторичного свинца. Их переработка позволяет уменьшить объём опасных отходов и вернуть свинец в производственный цикл. Традиционно переработка основана на высокотемпературной плавке, однако такой подход характеризуется значительными энергозатратами, образованием шлака и необходимостью очистки отходящих газов [1].

Перспективной альтернативой являются гидрометаллургические и электрохимические процессы. Их преимуществом является возможность проведения основных стадий при значительно более низкой температуре. Электрохимический способ основан на растворении свинецсодержащего материала на аноде и последующем выделении металлического свинца на катоде [1, 2].

Основная часть. Активная масса отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов содержит преимущественно PbO_2, PbO и $PbSO_4$. Доля свинца в свинцесодержащем шламе может составлять 45–65 %, при этом количество шлама составляет около 10–12 % от общей массы свинца аккумулятора. Перед электрохимической обработкой материал необходимо подготовить: провести разделение компонентов, десульфатацию, перевод соединений свинца в растворимую форму, фильтрацию и корректировку состава электролита.

Общая схема электрохимической переработки имеет следующий вид: отработанный аккумулятор → дробление и разделение → свинцесодержащая паста → химическая подготовка → анодное растворение → очистка электролита → катодное осаждение свинца → рафинирование продукта.

В качестве одного из исследованных электролитов применялся борофторборатный раствор следующего состава: HBF_4 – 180 г/л, $Pb(BF_4)_2$ – 30 г/л, H_3BO_3 – 30 г/л, поверхностно-активное вещество – 1 г/л. Без приложения электрического тока скорость химического растворения составляла 0,068 кг/(м²·ч), что значительно ниже скорости, получаемой при электрохимическом воздействии.

Исследования проводились при температуре 40 °С. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели электрохимического растворения и осаждения свинца при 40 °С

Скорость растворения, кг/(м²·ч)	**Скорость осаждения, кг/(м²·ч)**	**Плотность тока, А/м²**	**Выход по току, %**
0,63	0,50	800	75,0
2,96	2,94	320	98,9
0,54	0,45	106	88,6
1,17	1,14	300	97,2

Максимальная исследованная скорость анодного растворения составила 2,96 кг/(м²·ч), а скорость катодного осаждения – 2,94 кг/(м²·ч). При плотности тока 320 А/м² выход по току достигал 98,9 %. Полученные результаты показывают, что при правильно выбранных параметрах процесса электрохимическое выделение позволяет эффективно переводить свинец из вторичного сырья в металлическую форму. Средняя скорость анодного растворения примерно на 8 % превышала скорость катодного осаждения.

Одним из важных вопросов применения фторборатного электролита является возможность образования фторсодержащих выбросов. Исследования показали зависимость скорости выделения фтора от концентрации HBF_4 (таблица 2).

Таблица 2

Зависимость скорости выделения фтора от концентрации HBF_4

$C_{(HBF_4)}$, г/л	**0**	**30**	**60**	**100**	**150**	**200**
Vуд F, г/(ч·м²)	0	0,6	1,8	2,7	4,2	4,9

Установлена практически линейная зависимость:

$$V_{уд}\ F = 0{,}026 \cdot C_{(HBF_4)}.$$

Следовательно, увеличение концентрации свободной борофтористоводородной кислоты сопровождается повышением потенциальных фторсодержащих выбросов. Поэтому промышленное применение такого электролита требует эффективной вентиляции и газоочистки. Рациональный состав электролита может включать HBF_4 – 180 г/л, $Pb(BF_4)_2$ – 100 г/л, H_3BO_3 – 30 г/л и поверхностно-активное вещество – 1 г/л при температуре около 40 °С.

В качестве альтернативы исследовались электролиты, не содержащие фтор. Одним из вариантов является малеиновый электролит на основе малеиновой кислоты и малеата свинца. Его состав включает малеиновую кислоту – 122 г/л и малеат свинца – 12,5 г/л, что соответствует примерно 9,7 г/л свинца. Для улучшения качества катодного осадка могут использоваться желатин, сульфитно-спиртовая барда, глицерин и этиленгликоль.

Зависимость допустимой плотности тока от концентрации соли свинца представлена в таблице 3.

Таблица 3

Параметры электроосаждения в малеиновом электролите

Концентрация соли свинца, г/л	**0**	**13,25**	**15,5**	**21,25**	**24,25**	**26,5**
Плотность тока, А/дм²	57	100	120	130	140	150

Малеиновый электролит обладает преимуществом – отсутствием фторсодержащих соединений в выбросах, однако скорость процесса при его использовании примерно в 2–4 раза ниже по сравнению с фторборатной системой. Таким образом, выбор электролита должен осуществляться с учётом одновременно производительности, энергетических затрат, качества катодного свинца и требований экологической безопасности.

Полученные результаты согласуются с современным направлением развития электрохимической переработки свинцово-кислотных аккумуляторов, в котором основное внимание уделяется низкотемпературным процессам, выбору электролита, повышению эффективности массопереноса и совершенствованию конструкции электрохимических реакторов [1, 2].

Заключение. Электрохимическая переработка отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов является перспективным направлением получения вторичного свинца. При температуре 40 °С в исследованном фторборатном электролите максимальная скорость растворения составила 2,96 кг/(м²·ч), скорость осаждения – 2,94 кг/(м²·ч), а выход по току достигал 98,9 % при плотности тока 320 А/м².

Список литературы

1. Султанова М. В. Переработка свинцово-кислотных аккумуляторов в малеиновом электролите / М. В. Султанова, А. И. Сердюк, С. П. Зырянов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – № 5 (133). – С. 84–89. – Текст: электронный. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/2018-5%28133%29/st_14_sultanova_serdyuk_zyryanov.pdf (дата обращения: 01.09.2026).
2. Ялалова М. М. Перспективы переработки утильных свинцово-кислотных аккумуляторов / М. М. Ялалова, А. И. Сердюк // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 72-82. – Текст: электронный – URL: https://donnu.ru/public/journals/files/2019%20%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%93%202.pdf (дата обращения: 04.10.2026).

УДК 622.537.86

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Соколов К.И., ORCID 0009-0000-0405-6632,
Подрухин А.А., ORCID 0009-0006-8598-4169,
Вишняк А.И.,
Гангало А.Н., канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-5683-1346
ФГБНУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк, РФ
ifgpdnr@mail.ru

Введение. Технологические операции по разработке угольных месторождений сопровождаются большим количеством физических процессов в угле и массиве горных пород. Большое количество выполненных исследовательских работ по данной тематике и регламентирующих документов связаны с обеспечением безопасности работ в самых различных аспектах: тепловой режим выработок, вентиляция, подавление пыли, а также защита систем противопожарной безопасности. Соблюдение правил ведения добычных работ, многократно обоснованных практически и теоретически, является неотъемлемой частью в современной угледобыче. При этом многие выполненные исследовательский работы и нормативные документы оперируют обобщенными характеристиками углепородного массива: прочность угля и вмещающих пород, газоносность угля, скорость выделения метана, влажность угля, фазовое состояние воды и метана и др. параметры [1, 2].

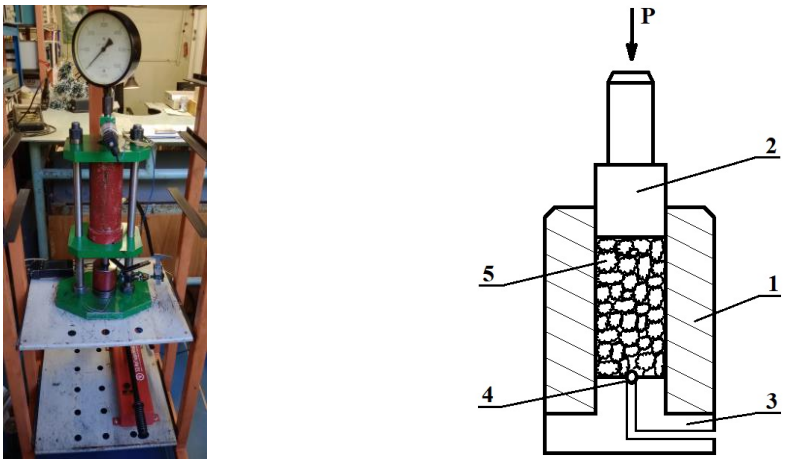
Для нормальной регистрации критерия безопасности достаточно использовать эмпирические формулы, которые определяются для каждого конкретного пласта экспериментально [3].

Цель работы – определение физических свойств углей и горных пород при помощи лабораторной установки, оснащенной контейнером высокого давления 800 МПа и регистрирующей аппаратурой параметры деформации, температуры, выбросов, горных ударов и техногенных возгораний.

Основная часть. Разработанная в ФГБНУ «ИФГП» установка для определения физических свойств горных пород (рис. 1 *а*) позволяет получать набор физических характеристик исследуемых образцов угля и горных пород под воздействием запредельных давлений до 800 МПа, который включает в себя прочность, вязкость, метаноносность, влажность и температуру.

Перед проведением экспериментальных исследований установку подготавливают к работе путем размещения в ней контейнера с предварительно измельченным до заданной фракции сыпучим образцом угля или горной породы. Контейнер (рис. 1 *б*) состоит из обоймы *1*,

пуансона *2*, вкладыша со сбрасывающим каналом *3*, смонтированной платиновой термопары Pt-100 с заглушкой *4* и помещенной внутрь фракции исследуемого угля или горной породы *5*.



а *б*

Рис. 1. Лабораторная установка (*а*) и схема контейнера с сыпучим образцом (*б*)

Для регистрации параметров проведения исследований на установке используется контроллер на базе микропроцессора ATMEGA 2560 с подключенными к нему датчиками:

– датчик управления Wika S-10;

– датчик перемещения DP15;

– термопара платиновая Pt-100.

Поступающая с датчиков информация предварительно обрабатывается микропроцессором ATMEGA 2560 и в преобразованном и удобном для чтения виде через интерфейс UART RS232 ежесекундно передается на персональный компьютер для записи данных и дальнейшей их обработки.

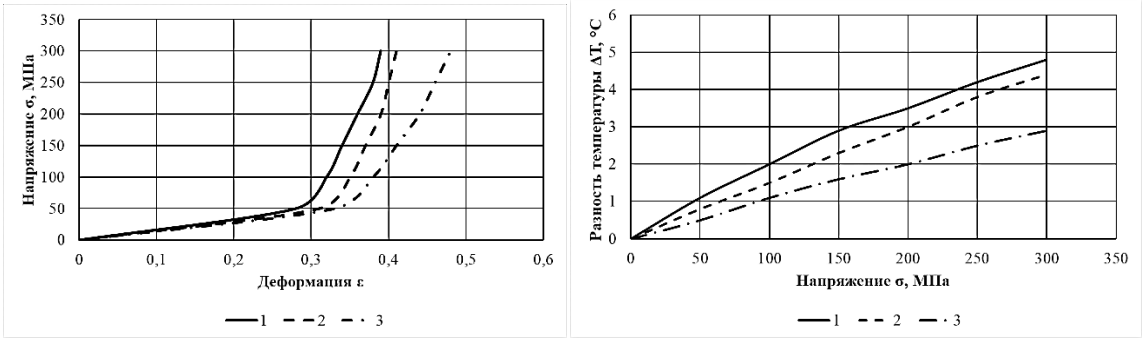
Создание давления в контейнере производится с помощью гидроцилиндра установки с усилием 200 кН и гидравлического насоса 80 МПа по замкнутой схеме. Нагнетание рабочей жидкости в гидроцилиндр установки осуществляется с помощью металлорукава высокого давления до 800 МПа.

Для проведения исследований были отобраны три образца угля – из неопасных по внезапным выбросам метана шахт «Прогресс», «Шахтерская-Глубокая» и опасной по внезапным выбросам шахты «им. А.А. Скочинского». Нагружение исследуемых образцов производилось при заданном давлении гидросистемы установки равном 300 МПа. В процессе сжатия сыпучего образца, помещенного в контейнер, в режиме реального времени регистрировались давление (P, МПа), пересчитываемое в напряжение сжатия (σ, МПа) и перемещение (x, м), по которым в дальнейшем рассчитывалась деформация образца (ε). Одновременно с этим регистрировалась температура исследуемых образцов, что позволило построить зависимости смещения от времени и от температуры, а также

деформации (ε) от разности начальной и текущей температур (ΔT, °С) по каждому образцу.

Одновременно с деформацией регистрировался термический эффект – разность между начальной и текущей температурой исследуемого образца.

Полученные зависимости деформации и разности температуры образцов от напряжения сжатия приведены на рис. 2.



а *б*

Рис. 2. Графики зависимости деформации (*а*) и разности температуры образцов (*б*) от напряжения сжатия для углей шахт «Прогресс» (1), «Шахтерская-Глубокая» (2) и «им. А .А . Скочинского» (3)

Наибольшие значения деформации зафиксированы для выбросоопасных углей шахты «им. А.А. Скочинского» (ε=0,48) а наименьшие – для углей шахты «Прогресс» (ε=0,39). Наиболее выраженный термический эффект (ΔТ=4,8°С при давлении 300 МПа) зафиксирован в угле шахты «Прогресс», а наименее выраженный – в выбросоопасном угле шахты «им. А.А. Скочинского» (ΔТ=2,9°С при давлении 300 МПа).

Заключение. Полученные с помощью лабораторной установки результаты экспериментальных исследований позволяют оценить склонность угольных пластов к внезапным выбросам метана и в дальнейшем обеспечить безопасность ведения горных работ при разработке угольных месторождений.

Список литературы

1. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов / А. Д. Алексеев. – Киев: Наукова думка, 2010. – 420 с.
2. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л. С. Лейбензон. – Москва-Ленинград: ОГИЗ, 1947. – 244 с.
3. Алексеев А. Д. Предельное состояние горных пород / А. Д. Алексеев, Н. В Недодаев. – Киев: Наукова думка, 1982. – 200 с.

УДК 656.13:504.5

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ОКТАНОВЫХ ЧИСЕЛ БЕНЗИНОВ, ВЫРАБОТАННЫХ ИЗ НЕФТИ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ, МЕТОДОМ БЛИЖНЕЙ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Сытник Е.С., канд. техн. наук, ORCID 0009-0006-0652-1650,
Пащенко Д.Ю.
Автомобильно-дорожный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка, ДНР, РФ
e.s.sytnik@yandex.ru, andr_e@mail.ru

Введение. Экологические показатели автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в значительной степени определяются детонационной стойкостью применяемого бензина, количественной мерой которой служит октановое число (ОЧ). ОЧ влияет на характер сгорания топливно-воздушной смеси в цилиндрах: с его ростом повышается полнота и равномерность процесса, эффективнее используется энергия топлива и снижается вероятность его неполного окисления с образованием токсичных компонентов в отработавших газах (ОГ) ДВС.

Поскольку характеристики бензина определяются составом исходного сырья, изменения в ресурсной базе нефтедобычи непосредственно отражаются на качестве товарных топлив. В последние годы структура этой базы претерпевает существенные изменения: по прогнозным оценкам Аналитического центра ТЭК [1], доля трудноизвлекаемых запасов (ТрИЗ) – сырья с более сложными и менее стабильными физико-химическими характеристиками – в российской нефтедобыче возрастёт с 63 % в 2025 году до 83 % к 2035 году и до 87 % к 2050 году. Это может усилить неоднородность качества бензинов, включая детонационную стойкость, и создать эксплуатационные, экологические и экономические риски для автомобильного транспорта (АТ). Дополнительным фактором служит длинная цепочка перевалки, хранения и реализации топлива между нефтеперерабатывающим заводом (НПЗ) и топливной системой автомобиля: на всём её протяжении стандарт задаёт лишь диапазон допустимых значений, а паспорт качества отражает характеристики партии на момент выпуска, но не фактическое состояние топлива в момент заправки. Возникает потребность в оперативном контроле ОЧ на уровне технической эксплуатации автомобилей (ТЭА).

Цель работы – обосновать методику оперативного контроля октановых чисел бензинов, выработанных из нефти ТрИЗ, методом ближней ИК-спектроскопии в системе технической эксплуатации автомобильного транспорта.

Основная часть. Поскольку конечным потребителем топлива в системе ТЭА являются предприятия автомобильного транспорта (ПАТ),

для организации оперативного контроля ОЧ с учётом их интересов ранее одной из авторов (Сытник Е.С.) была предложена концептуальная модель распределённой системы оперативного контроля качества топлив, включающая четыре уровня: распределения (нефтебазы, АЗС), эксплуатации (автопарки, ПАТ), надзора (мобильные лаборатории) и адаптации системы технического обслуживания (ТО) [2]. Модель задаёт метод контроля (ближняя ИК-спектроскопия) и организационную структуру, однако не раскрывает порядок практической реализации. В данной работе предлагается методика оперативного контроля ОЧ бензинов, которая включает два этапа.

Первый этап – экспериментальный – предполагает регистрацию спектров поглощения образцов бензинов в ближней ИК-области (1100–1300 нм) на портативном спектрофотометре с фиксацией условий измерения.

Выбранный диапазон соответствует области вторых обертонов колебаний связей С–Н; интенсивность поглощения зависит от концентрации соответствующих углеводородов [3]. Результатом этапа является массив первичных спектральных данных. Преимущества указанного метода перед традиционным моторным [4]: оперативность (1–5 мин против 30–60 мин); малый объём пробы (0,5–1,0 мл против 0,5–1,0 л); отсутствие расхода эталонных смесей; экологичность (без сжигания пробы, выбросов ОГ, шума и вибрации); мобильность (размещение на АЗС, в автопарках, ПАТ); достаточная точность (стандартная ошибка предсказания 0,30–0,34 ед. ОЧ). При этом метод ближней ИК-спектроскопии не подменяет сертификационные и арбитражные процедуры по ГОСТ 511-2022 «Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Метод определения октанового числа»: определение ОЧ по этому стандарту выполняется моторным методом на стационарном оборудовании, что исключает его применение в условиях эксплуатации. Предлагаемая методика дополняет эту процедуру как средство оперативного контроля на уровне ТЭА.

Второй этап – расчётный – включает построение калибровочной модели «спектр – ОЧ» с использованием эталонных образцов, расчёт ОЧ для каждой пробы и сопоставление результата с нормативным значением для соответствующей марки бензина. На основании этого формируется заключение о соответствии партии топлива стандарту для данной марки бензина и рекомендации по её использованию: допуск к заправке автомобилей, корректировка регламентов ТО, работа с поставщиком топлива на ПАТ.

В системе ТЭА методика решает комплекс задач: верификацию фактического качества бензинов (установление реального ОЧ и его сопоставление с паспортом и стандартом), формирование доказательной базы для претензионной работы с поставщиком топлива, планирование ТО

с учётом качества бензина (корректировка интервалов замены масел, свечей, обслуживания системы питания), диагностику экологических показателей автомобилей (по полноте сгорания и составу ОГ), управление эксплуатационными затратами (отказ от некачественных партий топлива предотвращает преждевременный износ ДВС), обеспечение надёжности подвижного состава АТ (предотвращение детонации и ускоренного износа) и эксплуатационной безопасности АТ (исключение потери мощности ДВС, перегрева и отказов систем питания и зажигания).

Заключение. Показано, что октановое число служит количественной мерой детонационной стойкости бензина и определяет полноту сгорания топливно-воздушной смеси, а следовательно, и экологические показатели автомобильных двигателей.

Установлено, что увеличение доли трудноизвлекаемых запасов в нефтедобыче снижает стабильность характеристик товарных бензинов, а паспорт качества топлива и нормативный диапазон стандарта не всегда отражают фактическое ОЧ в момент заправки автомобиля. Это подтверждает необходимость оперативного контроля на уровне ТЭА.

Обоснована необходимость оперативного контроля ОЧ бензинов, выработанных из нефти ТрИЗ и предложена методика его реализации методом ближней ИК-спектроскопии в системе ТЭА. Методика включает экспериментальный (регистрация спектров поглощения в ближней ИК-области 1100–1300 нм) и расчётный (построение калибровочной модели, расчёт ОЧ пробы, оценка соответствия партии бензина нормативным значениям стандарта, формирование рекомендаций по её использованию).

Методика служит инструментом оперативного контроля и не заменяет сертификационные и арбитражные процедуры, выполняемые по ГОСТ 511-2022 моторным методом.

Список литературы

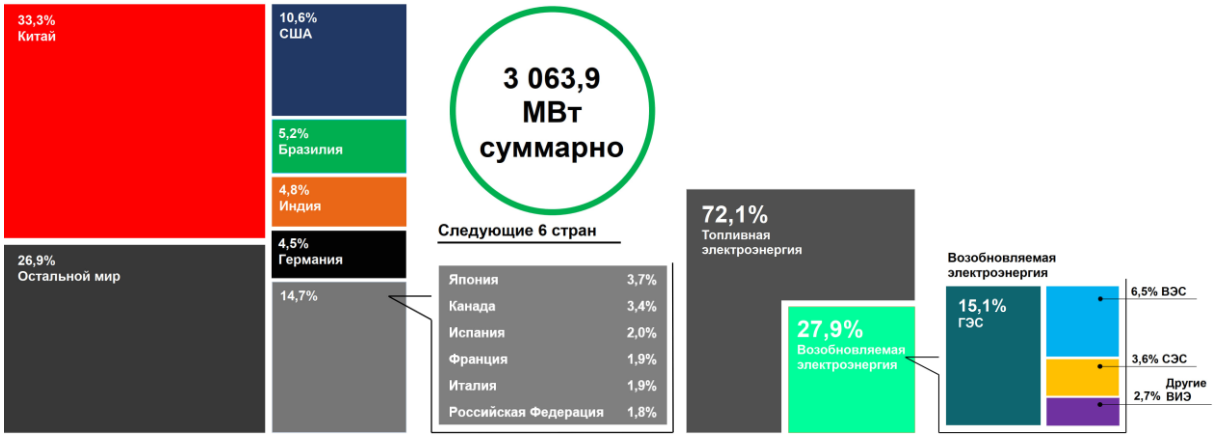
1. Игнатьева, А. А. Новак: мировой спрос на нефть сохранит рост до 2050 г., доля ТрИЗ в добыче РФ может достигнуть 87 % [Электронный ресурс] / А. Игнатьева // Neftegaz.RU. – 2026. – 2 марта. – URL: https://neftegaz.ru/news/dobycha/917063-a-novak-mirovoy-spros-na-neft-sokhranit-rost-do-2050-g-dolya-triz-v-dobyche-rf-mozhet-dostignut-87/ (дата обращения: 01.10.2026).
2. Сытник, Е. С. Распределённая сеть экспресс-контроля топлив как инструмент обеспечения безопасности автотранспорта при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти / Е. С. Сытник // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2026. – № 1(56). – С. 17-26. – DOI 10.5281/zenodo.20591793. – EDN RWGBDL.М. Отто. Современные методы аналитической химии. – Москва: Техносфера, 2021. – 656 с. – ISBN 978-5-94836-615-9.
3. Сытник, Е. С. Ик-спектроскопическое определение детонационной стойкости бензинов – новая концепция в экологизации автотранспорта и его инфраструктуры / Е. С. Сытник // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы IX Международной научной конференции, Донецк, 15–17 октября 2024 года. – Донецк: ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2024. – С. 71-74. – EDN ORAITM.

УДК 621.311.24

ВЛИЯНИЕ ДОЛИ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНЫМИ И ВЕТРЯНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ НА ЕЁ СТОИМОСТЬ В ЕДИНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Трубаев П.А., д-р техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-1710-1599
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, РФ
trubaev.pa@bstu.ru

В настоящее время в Европейских странах доля выработки электроэнергии солнечными и ветряными электростанцимями занимает значительный объем (рис. 1).



Страны с наибольшей установленной мощностью ВИЭ (включая гидроэлектро-станции) по состоянию на 1.01.2022 г.	Доля ВИЭ (епо видам) в производстве электрической энергии (2021 г.)

Рис. 1. Развитие ВИЭ-генерации в мире [1]

В 2005–2015 гг. в европейских странах проведено ряд исследований, в которых на основании рыночных данных и модельных расчётов показано, что с ростом доли ветровой и солнечной генерации стоимость электроэнергии для потребителей заметно снижается [2, 3]. Вместе с тем, в других работах отмечется, что определение цены электроэнегии только на основании приведённой стоимости (LCOE) объектов генерации уменьшает общие затраты [4], так как при увеличении доли прерывистых источников заметно возрастают затраты сетевую инфраструктуру, на балансирование и и резервы, что заметно повышает полную стоимость электроэнергии [5].

Российская практика сложившееся мнение, что возобновляемая энергетика дешевле традиционной топливной, опровергает. По оценке НП «Совет рынка», выполненной в 2017 г., средневзвешенная стоимость электроэнергии, выработанной построенных по программа ДПМ-ВИЭ СЭС составила 30 руб. за кВт·ч, тогда как эти показатели для ТЭС были равны 3,4 руб., АЭС – 3,8 руб. По этой же оценке прогнозам цена

электроэнергии, выработанной на ВЭС, достигнет 10–12 руб. за кВт·ч (https://www.kommersant.ru/doc/3374284). По результатам конкурсных отборов на период 2025-2028/29 гг. средневзвешенная стоимость электрической энергии в ценах 2023 г. для ВЭС составила 4,6…5,7 руб./кВт·ч, для СЭС – 7,8…8,0 руб./МВт·ч (https://www.eprussia.ru/market-and-analytics/2828998.htm), при средневзвешенной оптовой стоимости электроэнергии в 2023 г. 2,3…2,8 руб./кВт·ч.

В работе проанализировано завиисмость стоимости электроэнергии в европейских странах в засисимости от лдоли солнечной и ветрогенерации в их энергетичемом балансе. На сайте Европейской комиссии публикуются данные Евростата (https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database), в том числе доля различных источников в вырабатываемой электроэнергии (база данных «nrg_ind_ren») и цены на электроэнергию для населения и промышленности в странах Европы (базы данных соответственно «nrg_pc_204_c» и «nrg_pc_205_c»).

В стоимость электроэнергии включены налоги и сборы (рис. 2):

- Energy – Energy and supply (Энергетика и энергоснабжение);
- Network – Network costs (Сетевые издержки);
- VAT – Value added tax (НДС);
- Renewable – Renewable taxes (Налоги на ВИЭ);
- Capacity – Capacity taxes (Налоги на мощность);
- Environmental – Environmental taxes (Экологические налоги);
- Nuclear – Nuclear taxes (Налоги на атомную энергетику);
- Other – прочие налоги.

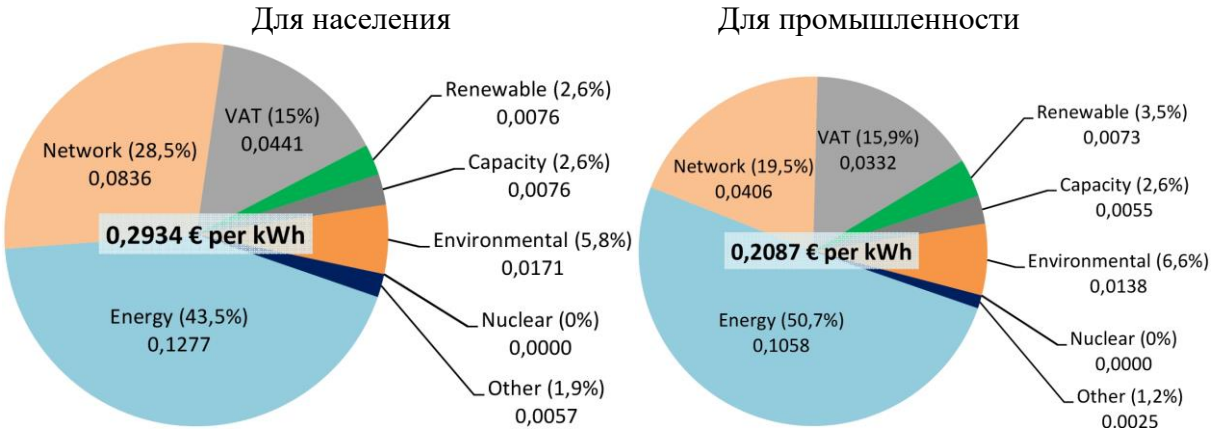


Рис. 2. Структура стоимости электроэнергии в странах Европы, средняя по всем группам мощности (построено по наборам данных «nrg_pc_204_c» и «nrg_pc_205_c, energy consumption: all bands, 2025 г.)

Несмотря на заметный разброс, тенденция увеличения стоимости электроэнергии для населения от доли ВИЭ заметна (рис. 3а). Для промышлености тенденция так же имеется, но незначительная (рис. 3б).

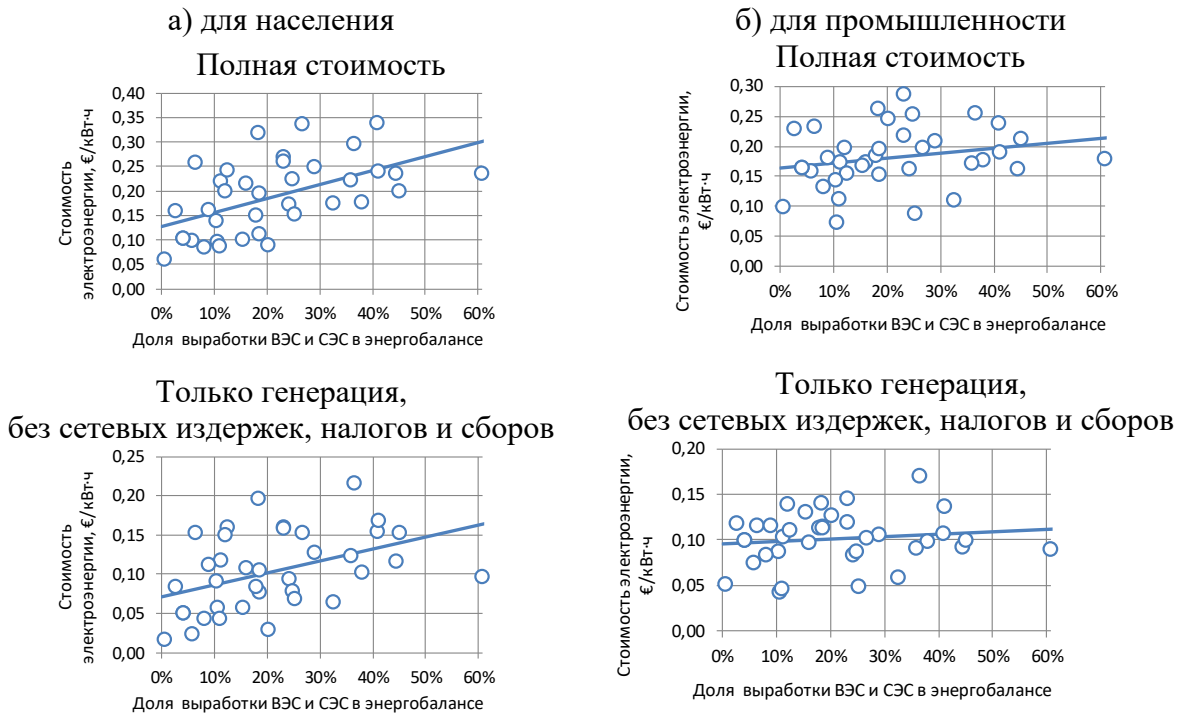


Рис. 3. Зависимость стоимости электроэнергии в странах Европы от доли ВИЭ в энергобалансе страны (данные 2025 г.)

Вывод. В странах, имеющих в энергобалансе значительное количество электроэнергии, выработанной с использованием солнечной и ветрогенерации, более высокие цены на электроэнергию для бытовых потребителей. Несмотря на то, что при развитии ВИЭ повышение стоимости заявлялось кратковременным, эта тенденция сохраняется и в настоящее время, после 10 лет «энергетического перехода».

Список литературы

1. Возобновляемая энергетика в России и мире. – М.: РЭА, 2022. – 104 с. – URL: https://rosenergo.gov.ru/upload/iblock/e04/3xtm87iv99x76b23c6wjul3as5pzz8zj.pdf (дата обращения 09.10.2026 г.)
2. Sensfuß, F. The merit-order effect: a detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany / F. Sensfuß, M. Ragwitz, M. Genoese // Energy Policy. – 2008. – Vol. 36, no. 8. – P. 3086-3094. – DOI: 10.1016/j.enpol.2008.03.035.
3. Würzburg, K. Renewable generation and electricity prices: taking stock and new evidence for Germany and Austria / K. Würzburg, X. Labandeira, P. Linares // Energy Economics. – 2013. – Vol. 40, suppl. 1. – P. S159-S171. – DOI: 10.1016/j.eneco.2013.09.01.
4. Joskow, P. L. Comparing the costs of intermittent and dispatchable electricity generating technologies / P. L. Joskow // American Economic Review. – 2011. – Vol. 101, no. 3. – P. 238-241. – DOI: 10.1257/aer.101.3.238
5. System LCOE: What are the costs of variable renewables? / F. Ueckerdt, L. Hirth, G. Luderer, O. Edenhofer // Energy. – 2013. – Vol. 63. – P. 61-75. – DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.072.

УДК 711.58:697.1

ПОРОГОВАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ

Туровец П.К., ORCID 0009-0004-6766-8774,
Король Е.А., д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-5019-3694
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, РФ
paulineturovez@gmail.com, KorolEA@mgsu.ru

Введение. Оценку формы жилой застройки связывают с энергопотреблением и микроклиматом [1]. При этом мероприятия по теплозащите оболочки [2] и методы определения ее параметров [3] рассматриваются на уровне здания. Для сопоставления планировочных вариантов предлагается проверять, сохраняется ли их ранжирование по теплопотерям при неопределенных характеристиках ограждений.

Цель – найти порог соотношения характеристик ограждений, при котором варианты меняются местами по трансмиссионным теплопотерям. Такой порог позволяет установить, достаточны ли исходные данные для выбора застройки. Рассматривается передача теплоты через оболочку; полное энергопотребление квартала не рассчитывается.

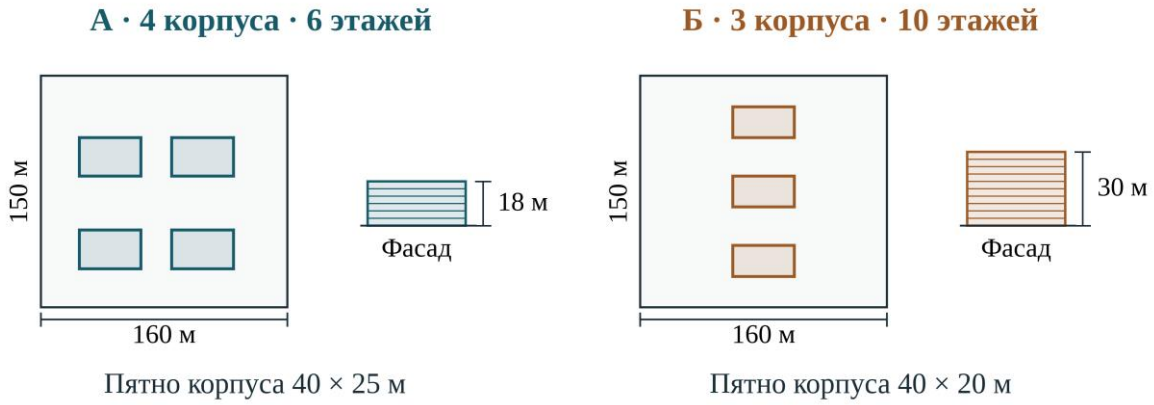


Рис. 1. Схемы модельной застройки на одинаковых участках (построено авторами; размещение корпусов условное)

Модель. Для расчетного эксперимента авторами заданы участок 160 × 150 м и две схемы: четыре шестиэтажных корпуса 40 × 25 м (А) и три десятиэтажных корпуса 40 × 20 м (Б), рис. 1. Высота этажа – 3 м; суммарная отапливаемая площадь этажей F в обоих случаях равна 24 000 м².

Приняты прямоугольные призмы без пристроек; площадь покрытия равна площади нижнего перекрытия. Линейные тепловые мосты исключены. Зависимость (1) учитывает площадную составляющую коэффициента теплопотерь [4].

$$h_{\mathrm{tr}} = \frac{H_{\mathrm{tr}}}{F} = \frac{U_{\mathrm{f}}A_{\mathrm{f}} + (U_{\mathrm{r}} + U_0)A_{\mathrm{r}}}{F}, \quad (1)$$

где H_{tr} – коэффициент трансмиссионных теплопотерь, Вт/К; A_{f} – площадь фасадов с окнами; A_{r} – площадь покрытия, м²; U_{f} – средневзвешенный по площади коэффициент теплопередачи фасада с окнами; U_{r} – коэффициент покрытия; U_0 – приведенный к наружному перепаду температур коэффициент нижнего перекрытия, Вт/(м²·К). Граничные условия и коэффициенты одноименных ограждений одинаковы для А и Б; $U_{\mathrm{f}} > 0$. Величина h_{tr} измеряется в Вт/(м²·К).

Для сравнения введем безразмерный критерий J и отношение r. Меньшему J при общем U_{f} соответствуют меньшие удельные теплопотери:

$$J = \frac{h_{\mathrm{tr}}}{U_{\mathrm{f}}} = a + rb, \quad a = \frac{A_{\mathrm{f}}}{F}, \quad b = \frac{A_{\mathrm{r}}}{F}, \quad r = \frac{U_{\mathrm{r}} + U_0}{U_{\mathrm{f}}}. \quad (2)$$

Таблица

Геометрические параметры (расчет авторов)

Показатель	А	Б
Площадь фасадов A_{f}, м²	9 360	10 800
Площадь покрытия A_{r}, м²	4 000	2 400
Отношение a = A_{f} / F	0,390	0,450
Отношение b = A_{r} / F	1/6	1/10

Вариант А имеет меньшую площадь фасадов, но большую площадь покрытия (табл. 1). Поэтому преимущество зависит от r. При $a_{\mathrm{А}} < a_{\mathrm{Б}}$ и $b_{\mathrm{А}} > b_{\mathrm{Б}}$ из равенства $J_{\mathrm{А}} = J_{\mathrm{Б}}$ следует порог:

$$r^* = \frac{a_{\mathrm{Б}} - a_{\mathrm{А}}}{b_{\mathrm{А}} - b_{\mathrm{Б}}} = \frac{0{,}45 - 0{,}39}{1/6 - 1/10} = 0{,}90. \quad (3)$$

При r < 0,90 предпочтителен А, при r > 0,90 – Б; в пороге варианты равноценны. Если заданный интервал r целиком лежит по одну сторону порога, выбор устойчив в пределах модели. Пересечение порога означает, что геометрических данных для однозначного выбора недостаточно. Число 0,90 относится только к данной паре схем.

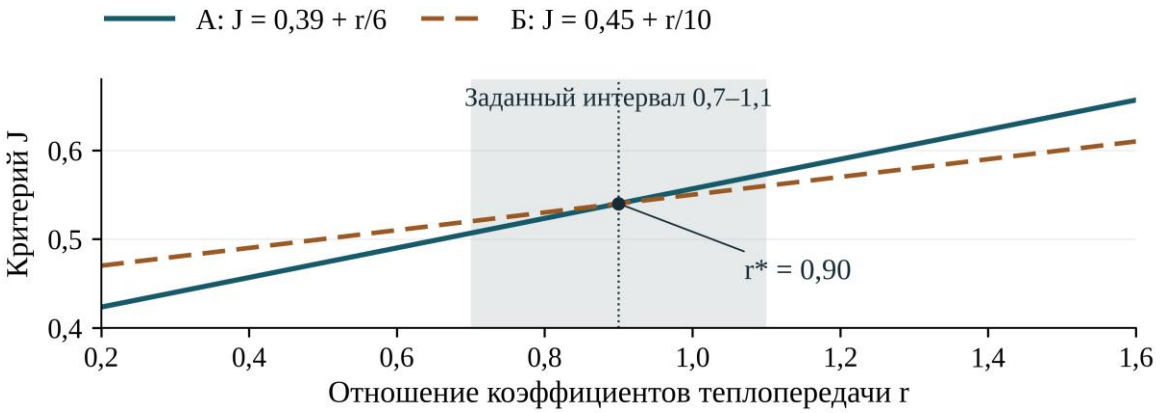


Рис. 2. Смена предпочтительного варианта и интервал неопределенности теплозащиты (расчет авторов)

Результат. Для демонстрации задан интервал r = 0,7–1,1; это сценарное допущение, не нормативный диапазон. На его границах разность $J_А - J_Б$ составляет соответственно −0,0133 и +0,0133. Знак меняется: оба варианта следует сохранить до уточнения ограждений (рис. 2). Тем самым расчет указывает, какие сведения способны изменить градостроительное решение, вместо преждевременного закрепления одного варианта.

Если в том же примере интервал уточнен до 0,7–0,8, вариант А получает устойчивое преимущество: разность $J_А - J_Б$ отрицательна во всем интервале. Для проектирования это задает порядок действий: установить диапазон r для допустимых ограждений, сопоставить его с порогом и только затем выбрать вариант либо сохранить альтернативы для многокритериальной оценки [1].

Заключение. Предлагаемый порог служит критерием достаточности исходных данных при сопоставлении эскизов равной площади. Его нельзя трактовать как оценку годовой экономии: солнечные поступления существенно дополняют анализ формы здания [5], а в модели не учтены также вентиляция, затенение, инженерные системы и требования к территории. Практический вывод – фиксировать вместе с вариантом застройки условие его теплотехнического преимущества. Это позволяет согласовывать планировочное решение с выбором оболочки здания, сохраняя альтернативы там, где результат пока зависит от неизвестного параметра.

Список литературы

1. Multi-objective optimization of morphology for high-rise residential cluster with the regards to energy use and microclimate / W. Feng, J. Chen, Y. Yang [et al.] // Energy and Buildings. – 2024. – Vol. 319. – Art. 114534. – DOI 10.1016/j.enbuild.2024.114534.
2. Technical solutions and technologies for energy-efficient overhaul of apartment buildings / E. A. Korol, P. K. Turovets, E. A. Solovyeva [et al.] // Construction Materials and Products. – 2025. – Vol. 8, no. 3. – Art. 4. – DOI 10.58224/2618-7183-2025-8-3-4. – EDN CFSIVS.
3. Зубарев К. П. Обзор экспериментальных методов исследования теплотехнических параметров ограждающих конструкций / К. П. Зубарев, Ю. С. Зобнина, Ю. А. Сапронова и др. // Перспективы науки. – 2023. – № 10 (169). – С. 53–57. – EDN KAOVEE.
4. Grudzińska, M. Determining ‘as built’ heat loss coefficient – the impact of modelling methods of solar radiation distribution / M. Grudzińska, M. Baborska-Narożny, K. Bandurski // Journal of Building Performance Simulation. – 2026. – Vol. 19, no. 4. – P. 780–789. – DOI 10.1080/19401493.2025.2511814.
5. Li, J. Experimental and simulation study on the modified shape coefficient of building integrated thermal considerations for heating buildings in solar-enriched areas / J. Li, T. Yue, Y. Zhang // Solar Energy. – 2023. – Vol. 264. – Art. 112060. – DOI 10.1016/j.solener.2023.112060.

УДК 532.517.2: 518.12

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ВЫХОДЕ ИЗ КОНФУЗОРА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Финошин Н.В., канд. физ.-мат. наук, доц., ***Попова А.Е.,***
Белоусов Н.Е., Спажук Н.В.
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
_finoshin@donnu.ru

Для поверки напорных микротрубок Пито-Прандтля и градуировки термоанемометров на кафедре ФНПМЭ им. И. Л. Повха физико-технического факультета Донецкого государственного университета была разработана и изготовлена на 3D принтере аэродинамическая труба прямого действия (АТ).

Расчет аэродинамической трубы был выполнен в соответствии с рекомендациями [1]. Схема АТ приведена на рис. 1. АТ состоит из вентилятора *1*, который управляется частотным преобразователем *2*. Воздушный поток от вентилятора поступает через гофрированную трубу *3* в диффузор *4*, затем в форкамеру *5* и конфузор *9*.

Диаметр форкамеры $D_ф = 250мм$, диаметр выходного сечения конфузора $D_к = 75мм$.

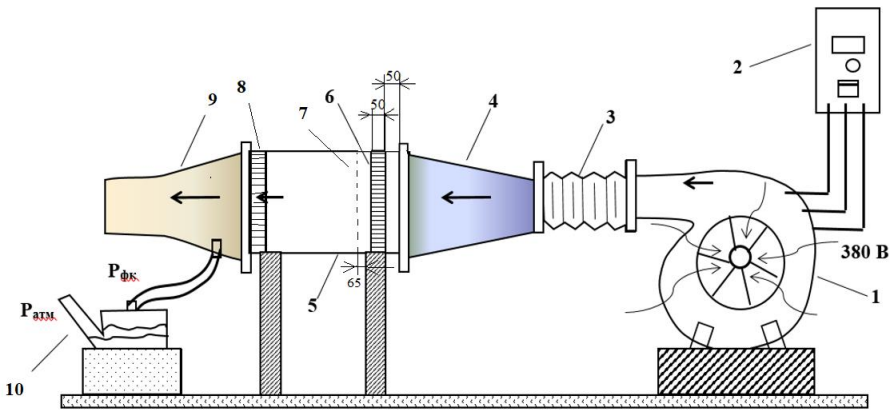


Рис. 1. Схема аэродинамической трубы прямого действия:
1 – высоконапорный вентилятор ВВД-5; 2 – частотный преобразователь; 3 – гофрированая труба; 4 – диффузор; 5- форкамера; 6 – хонейкомб № 1; 7 – сетка, 8 – хонейкомб № 2, 9 – конфузор; 10 – микроманометр ММН-2400

Поверка и градуировка средств измерения скорости воздушного потока должна проводиться в потоке воздуха с однородным полем скорости. Под однородностью полей скорости воздушного потока понимают поток с равномерными профилями скорости в выходном сечении конфузора АТ.

Существуют различные способы устранения неравномерностей профилей скорости воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы. В данной работе был использован метод установки в форкамеру хонейкомбов и металлических сеток. На 3D принтере были изготовлены два хонейкомба длиной по $50мм$ и с ячейками: хонейкомб № 1 – диаметр ячейк $6мм$; хонейкомб № 2 – диаметр ячейк $3мм$.

Измерения профилей скорости на выходе из конфузора АТ проводились с помощью напорной микротрубки Пито-Прандтля по осям Oy и Oz и микроманометра ММН-2400, класса точности 1,0. Схема микротрубки приведена на рис. 2.

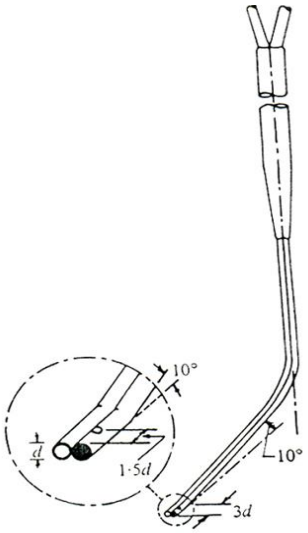


Рис. 2. Схема напорной микротрубки:
d = 1,3 *мм* – наружный диаметр капилляра; *3d* = 3,9 *мм* – длина горизонтальной части носика; *1,5d* = 1,95 *мм* – расстояние от носика напорной трубки до места расположения статического отверстия (диаметр статического отверстия – $d_{ст.} = 0,3$ *мм*); угол наклона остальной носовой части напорной трубки к горизонтальной плоскости равен 10

Экспериментальные исследования полей скорости на выходе из конфузора проводились в несколько этапов.

Этап 1. В форкамере аэродинамической трубы не были установлены ни хонейкомб, ни сетки. Профили скорости в нижней части сечения существенно неравномерны.

Этап 2. На входе в форкамеру на расстоянии $l = 50мм$ был установлен хонейкомб № 1 (ячейка $6мм$). Хонейкомб № 1 изменил распределение профилей скорости, полученные для варианта № 1, когда в форкамере не были установлены ни хонейкомб, ни сетки. Хонейкомб № 1 существенно затормозил значения скорости в центральной части выходного сечения конфузора, а неравномерность профилей скорости осталась существенной.

Этап 3. На расстоянии $l = 65мм$, согласно [2], от хонейкомба № 1 была установлена металлическая сетка, соответствующая ГОСТ 3826-82 [3] с параметрами $H = 1,2мм$ (размер ячейки), $d = 0,32мм$ (диаметр проволоки).

Для детурбулизирующих сеток, согласно [4], параметр $S = 1 - \left(1 - \frac{d}{M}\right)^2 \approx 0,4$, где $M = H + d$. Для выбранной сетки $S \approx 0,38$.

Установка металлической сетки за хонейкомбом № 1 существенно снизили неравномерность профилей скорости по осям Oy и Oz. Однако требовалось уменьшить неравномерность профилей скорости в нижней части выходного сечения конфузора.

Этап 4. На выходе из форкамеры был установлен хонейкомб № 2 с ячейкой $3мм$. Установка хонейкомба № 2 снизила неравномерность профилей скорости по осям Oy и Oz до значений меньше 1 %. В выходном сечении конфузора по осям Oy и Oz неравномерность профилей скорости равна $\Delta V = -0,075\%$; $\Delta V = +0,83\%$ и $\Delta V = -0,99\%$.

Таким образом была достигнута неравномерность профилей скорости ниже 1,0 %, что соответствует требованиям к рабочему эталону аэродинамических труб.

Выводы. 1. С помощью хонейкомба №1 с ячейками $(6 \times 6)мм$, установленном на входе в форкамеру, не удалось устранить неравномерность профилей скорости воздушного потока на выходе из конфузора.

2. С помощью металлической сетки с параметрами $H = 1,2мм$ (размер ячейки) и $d = 0,32мм$ (диаметр проволоки), соответствующей ГОСТ 3826-82 и установленной за хонейомбом №1, удалось существенно выровнять поля скоростей на выходе из конфузора за исключением нижней правой четверти выходного сечения конфузора.

3. Для окончательной ликвидации незначительной неравномерности профилей скорости воздушного потока в правой нижней четверти выходного сечения конфузора, на выходе из форкамеры был установлен хонейкомб №2 с ячейками $(3 \times 3)мм$, что позволило получить степень неравномерности полей скорости меньше 1,0 % процента. Этот показатель соответствует требованиям к рабочим эталонам аэродинамических труб.

Список литературы

1. Горлин С. М. Аэромеханические измерения (методы и приборы) / С. М. Горлин, Н. И. Слезингер. – М.: Наука, 1964. – 720 с.
2. Михайлов Н. П. Сочетание хонейкомба с сеткой для подавления турбулентности потока / Н. П. Михайлов, Е. У. Репик, Ю. П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ, 1998. – Т. 9. – № 1. – С. 86–94.
3. ГОСТ 3826-82. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками // Введ. 01.01.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 13 с.
4. Дербунович Г. И. Оптимальные условия гашения турбулентности потока в рабочей части аэродинамической трубы с помощью сеток, установленных в форкамере / Г. И. Дербунович, А. С. Земская, Е. У. Репик и др. // Ученые записки ЦАГИ, 1989. – Т. 20. – № 3. – С. 37–43.

УДК 532.517.2: 518.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ЗОНЕ ТРУБ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ (ТПИПС)

Финошин Н.В., канд. физ.-мат. наук, доц., ***Попова А.Е., Степанова Е.И., Половникова В.А.***
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
_finoshin@donnu.ru

Экспериментально было обнаружено, что при некоторых условиях на вогнутой поверхности возникают продольно ориентированные вращающиеся в противоположные стороны пары вихрей. Эти вихри назвали вихри Гёртлера (в некоторых источниках – это вихри Тейлора-Гёртлера) – это вторичное течение, которое возникает в пограничном слое вблизи вогнутой поверхности [1].

Появление вихрей Гёртлера на вогнутой поверхности назвали центробежной неустойчивостью. Эта неустойчивость может возникать в широком классе сдвиговых течений с искривленными линиями тока в результате сильной неоднородности действия центробежных сил. В частности, хорошо известно, что ее появление в пограничном слое над вогнутой поверхностью способно существенно влиять на его характеристики: приводить к более ранней турбулизации (по сравнению со случаем пограничного слоя над плоской и выпуклой поверхностями), усиливать тепло- и массоперенос, изменять сопротивление трения и т. д. Эти явления происходят вследствие усиления параллельных потоку гёртлеровских вихрей [2, 3].

Для исследования возможности снижения полного гидродинамического сопротивления с помощью использования трубопровода с периодически изменяющимся поперечным сечением (ТПИПС) на кафедре ФНПМЭ им. И. Л. Повха был разработан и изготовлен аэродинамический стенд АС-5.

В ТПИПС есть зоны с вогнутыми и выпуклыми поверхностями. В связи с этим была поставлена задача исследовать возможность возникновения вихрей Гёртлера на вогнутых участках ТПИПС на АС-5. Эти исследования позволяют изучить характер течения воздушного потока в пограничном слое ТПИПС и проанализировать как влияют вихри Гёртлера на коэффициент полного гидродинамического сопротивления в ТПИПС [4].

Исследования структуры потока воздуха в трубопроводе с периодически изменяющимся поперечным сечением (ТПИПС) проводились на аэродинамическом стенде АС-5.

Схема АС-5 приведена на рис. 1 с описание его основных частей.

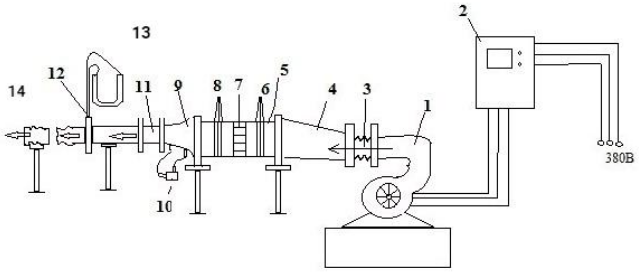


Рис. 1. Схема аэродинамического стенда АС-5: 1 – центробежный вентилятор высокого давления; 2 – частотный преобразователь; 3 – гофрированная переходная труба; 4 – диффузор; 5 – форкамера; 6 – решетка; 7 – хонейкомб; 8 – сетки; 9 – конфузор; 10 – жидкостный микроманометр ММН-2400; 11 – переходный участок прямой трубы; 12 – стандартная диафрагма; 13 – U-образный манометр; 14 – трубопровод с периодически изменяющимся поперечным сечением (ТПИПС)

Измерение профилей средней скорости в пристеночной области осуществлялось на выходе из 4-ой секции конфузора третьего участка ТПИПС. Для перемещения микротрубки Пито-Прандтля от стенки вверх по радиусу к центру секции ТПИПС использовался координатник с шагом перемещения $\Delta r = 0{,}1\ мм$. Измерения проводились на трех режимах частотного преобразователя: $f = 10\ Гц$; $f = 15\ Гц$; $f = 20\ Гц$.

На рис. 2 приведены графики профилей средней скорости в пристеночной области для этих трех режимов работы вентилятора.

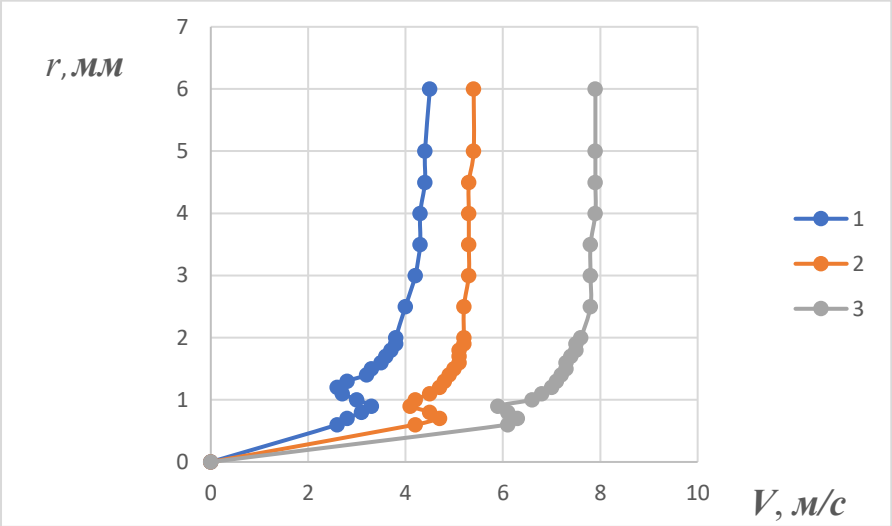


Рис. 2. Профили продольной скорости воздушного потока в пристеночной области на выходе из 4-го конфузора (сечение 11):
1 – $f = 10\ Гц$; 2 – $f = 15\ Гц$; 3 – $f = 20\ Гц$

Из графика 1 (рис. 2) видно, что в пристеночной зоне на выходе из 4-го конфузора присутствуют вихри Тейлора-Гёртлера. Об этом говорят два перегиба профиля скорости.

Для кривой 1 толщина пограничного слоя составляет 6 мм, а скорость на границе пограничного слоя составляет 4,5 м/с.

Из графика 2 (рис. 2) видно, что на выходе из 4-го конфузора присутствуют вихри Тейлора-Гёртлера. Об этом говорят два перегиба профиля скорости.

Для кривой 2 толщина пограничного слоя составляет 5 мм, а скорость на границе пограничного слоя составляет 5,4 м/с.

Из графика 3 (рис. 2) видно, что на выходе из 4-го конфузора присутствуют вихри Тейлора-Гёртлера. Об этом говорят два перегиба профиля скорости.

Для кривой 3 толщина пограничного слоя составляет 4 мм, а скорость на границе пограничного слоя составляет 7,9 м/с.

Выводы:

1. В трубопроводе с периодически изменяющимся поперечным сечением (ТПИПС) проведены измерения профилей продольной составляющей скорости воздушного потока в пристеночной области на выходе из конфузорно-диффузорных секций ТПИПС.

2. На трех режимах работы частотного преобразователя, регулирующего скорость воздушного потока на АС-5 $f = 10\,Гц$, $f = 15\,Гц$, $f = 20\,Гц$ обнаружены два перегиба профилей скорости на всех режимах. Это говорит о наличии в пристеночной области вихрей Гёртлера.

3. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют планировать продолжение экспериментов по определению зон существования вихрей Гёртлера на всем протяжении пристеночной зоны трубопровода с периодически изменяющимся поперечным сечением.

Список литературы

1. Кортиков Н. Н. Турбулентная пристеночная струя на искривлённой поверхности / Н. Н. Кортиков, Ю. А. Соковишин // Гидрогазодинамика: межвуз. сб. / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Куйбышев. авиац. ин-т им. С. П. Королёва. – Куйбышев: КуАИ, 1972. – Вып. 2: / [редкол.: Л. И. Кудряшев (отв. ред.) и др.]. – 1974. – С. 26–32.
2. Халатов А. А. Турбулентная неустойчивость Тейлора-Гёртлера на вогнутой поверхности с откосом / А. А. Халатов, А. А. Авраменко // Теплофизика высоких температур – Киев, 1994. – Т. 32. – № 1. – С. 69-71.
3. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях массовых сил: обзор работ, выполненных в ИТТФ НАН Украины. Часть 3. Выпуклые и вогнутые поверхности / А. А. Халатов // Промышленная теплотехника – Киев, 2012. – Т. 34. – № 2. – С. 5-16.
4. Финошин Н. В. Влияние формы образующей на поля завихренности при ламинарном режиме течения в трубах с периодически изменяющимся поперечным сечением / Н. В. Финошин, А. Е. Попова // Труды первого международного научно-практического семинара «Повховские научные чтения» / Под общ. ред. Ступина А.Б. – Донецк: ДонНУ, 2010. – С. 88-94.

УДК 504.064.36

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ПЛОЩАДЕЙ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Чипижак Д.В., ORCID 0009-0003-4212-3009,
Долгих В.П., канд. техн. наук, ORCID 0009-0004-0539-0113
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
г. Алчевск, ЛНР, РФ
vidoscience@mail.ru

Введение. На фоне глобального дефицита воды, вызванного климатическими сдвигами и антропогенным воздействием, мониторинг поверхностных водных объектов становится критически важной задачей для Луганской Народной Республики [1]. Важным элементом обеспечения водой промышленного и коммунального секторов республики выступает Исаковское водохранилище, пополняемое рекой Белой. В связи с этим возникает необходимость в обновлении данных о состоянии данного объекта для принятия обоснованных управленческих решений, касающихся, например, площади и границах водоема. В качестве способов получения информации о водном объекте могут быть использованы аналитические расчеты, сложность которых связана с высокой степенью обобщения, полевые исследования, особенностью которых выступают большие трудозатраты и труднодоступность к местам сбора данных, а также анализ спутниковых снимков, позволяющий получать достаточно объективную информацию о большей части выбранной территории [2].

Цель работы – разработка метода построения многоуровневой системы для автоматизированного мониторинга площадей водных объектов, учитывающей взаимосвязи между элементами этой системы.

Основная часть. Независимо от способов, используемых при анализе и обработке данных, необходимо учитывать их многоуровневость и возможность дальнейшей автоматизации. Для мониторинга поверхностных водных объектов предлагается метод построения многоуровневой системы для автоматизированного мониторинга площадей водных объектов. Его особенностью является возможность построения общих логически-связанных последовательностей трансформации данных и представление их в виде параметрических семейств.

На рисунке 1 представлена структурная схема модели, отражающая представления формальных структур процессов обработки данных.

Нулевой уровень модели (нижняя часть схемы на рисунке 1) представляется в виде результатов измерений параметров. В этой части модели описывается поток данных, содержащий исходные и предварительно обработанные результаты измерений. Уровню k (средняя часть схемы на рисунке 1) соответствует структурное представление результатов

измерений. Предобработанная исходная последовательность измерений представляется в виде последовательности отдельных блоков (сегментов), что, например, при анализе спутниковых снимков соответствует отдельным кластерам, отличающимися размером или цветом пиксела. Спецификой верхнего уровня N является генерация графа состояний объекта, которая осуществляется путем интеграции разработанных измерительных шаблонов в структуру представления данных.

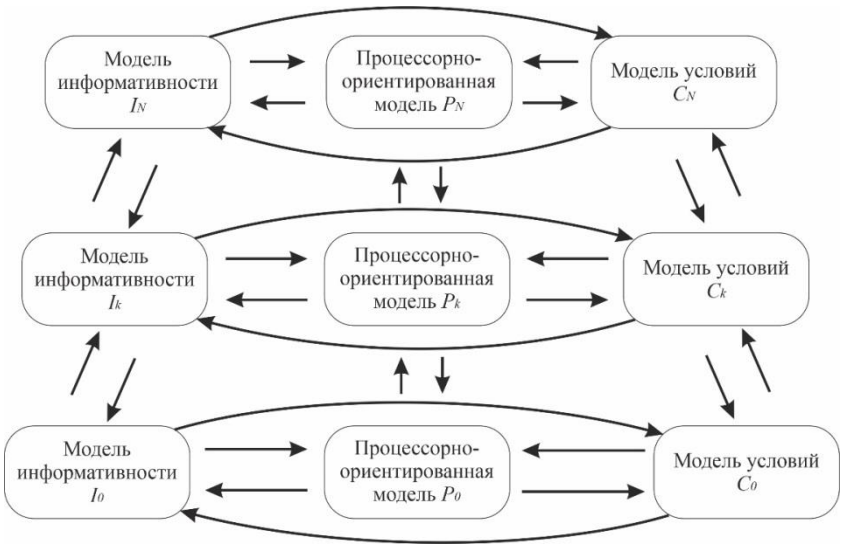


Рис. 1. Обобщенная многоуровневая модель обеспечения трансформации данных

Для каждого уровня определены три типа моделей:

– *C* (Conditions): исходное состояние данных;

– *I* (Information): целевое состояние данных;

– *P* (Processes): логика преобразования данных из состояния *C* в состояние *I*.

Для подтверждения возможностей предложенного метода построения многоуровневой системы для автоматизированного мониторинга площадей водных объектов представлены результаты обследования Исаковского водохранилища. Данная работа выполнялась в августе-сентябре 2025 года с использованием эхолот-картплоттера Lowrance Elite FS 9 [3]. Обработка данных выполнялась в программе ReefMaster. На рисунке 2 представлены результаты обработки эхограмм.

Заключение. Проведенное исследование показало, что использование в качестве метода расчета площадей водного объекта многоуровневой системы позволяет учитывать необходимую информацию на каждой итерации. Так, например, на начальном этапе выбиралось оборудование, условия проведения и план исследований. Далее на среднем уровне формулировались алгоритмы гидрологических расчетов, которые на верхнем уровне могут использоваться для комплексной оценки водного баланса водосборной территории, планирования водопользования и принятия мер по мониторингу состояния водоема.

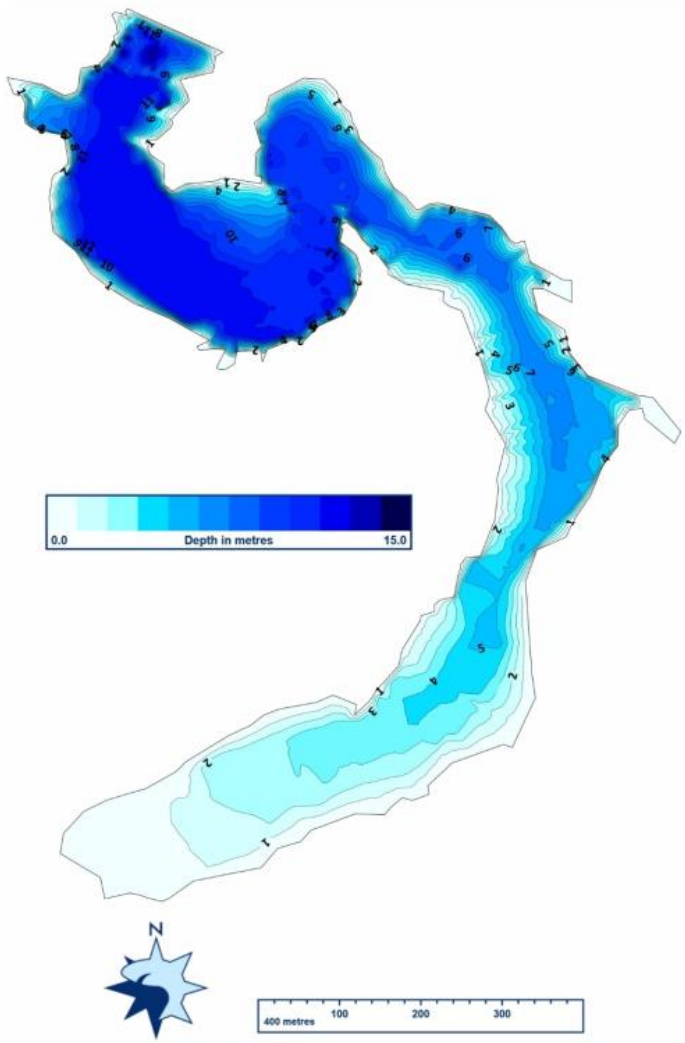


Рис. 2. Карта акватории Исаковского водохранилища, полученная в ReefMaster [3]

Информация о финансовой поддержке: *Исследования выполнены за счет средств федерального бюджета (код темы: FRRU-2024-0004 в ЕГИСУ НИОКТР).*

Список литературы

1. Долгих В. П. Методика водно-балансового расчета гидрологических характеристик (на примере реки Белая, Луганская Народная Республика) / В. П. Долгих, Л. К. Ерофеева, О. В. Сергейчук // Экологический вестник Донбасса. – 2025. – № 16. – С. 9–18. EDN CYDCHG
2. Рылов С. А. Геоинформационная система для автоматизированного мониторинга площадей водных объектов / С. А. Рылов, А. С. Лапушинский // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 4. – С. 46-50. DOI 10.33764/2618-981X-2025-4-46-50.
3. Долгих В. П. Применение гидроакустического комплекса Lowrance Elite FS 9 для мониторинга морфометрических характеристик исаковского водохранилища в условиях гидрологической засухи / В. П. Долгих, Н. П. Кусайко, А. Н. Майборода и др. // Экологический вестник Донбасса. – 2026. – № 1 (17). – С. 14-21. EDN: JOMFUP.

УДК 621.039.58:614.876

УДЕЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ УГЛЕРОДА-14 РОССИЙСКИХ АЭС С РАЗНЫМИ ТИПАМИ РЕАКТОРОВ ПО ДАННЫМ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Ямалов Б.Р., ORCID 0009-0005-1595-5883,
Базин Д.А., ORCID 0009-0003-0651-0714
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, РФ
bulatyamalov720@mail.ru, rezort12@mail.ru

Введение. Углерод-14 – один из главных дозообразующих радионуклидов в газоаэрозольных выбросах АЭС. Для ВВЭР-1200 на него может приходиться до 64 % дозы облучения населения [1]. Выброс ^{14}C сильно зависит от типа реактора [2]. В ВВЭР он образуется в основном из кислорода теплоносителя. В РБМК – ещё и из азота газовой смеси графитовой кладки. Фактические выбросы ^{14}C российских АЭС ежегодно публикует Росгидромет [3–5]. Если приборы АЭС радионуклид не обнаруживают, в таблицу вносят расчётное значение: половину нижнего предела измерения (НПИ), умноженную на объём выброса. Как отмечено в самом ежегоднике, такое значение не является фактическим выбросом [5]. Поэтому перед сравнением АЭС такие значения нужно отделить от измеренных.

Цель работы – по открытым данным определить удельные выбросы ^{14}C на 1 ГВт установленной мощности для АЭС с реакторами РБМК-1000, ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и БН и оценить, насколько от них отличаются расчётные значения.

Основная часть. Из ежегодников за 2021, 2023 и 2025 гг. [3–5] выписаны годовые выбросы ^{14}C десяти АЭС за 2020–2025 гг. Каждый выпуск содержит данные за отчётный и предыдущий год. Значение считалось расчётным, если оно так помечено в ежегоднике или если ряд меняется скачком более чем в 10 раз при неизменном составе энергоблоков. На рис. показаны пять характерных рядов ^{14}C.

Ряды на рис. делятся на две группы. В первую входят Курская, Кольская (с 2022 г.) и Ростовская АЭС. Их выбросы составляют 10^{11}–10^{12} Бк/год и почти не меняются по годам. Это измеренные значения: в последних выпусках ежегодника необнаруженные радионуклиды Курской и Белоярской АЭС отмечены знаком «<», а ^{14}C такого знака не имеет. Во вторую группу входят Балаковская, Кольская (до 2021 г.) и Смоленская АЭС. Их значения на два-три порядка ниже, около 10^{8}–10^{9} Бк/год, и меняются скачками в десятки и сотни раз. Для Балаковской АЭС ежегодник прямо указывает, что это расчётные значения [5]. Значения Смоленской и Кольской АЭС по тем же признакам также отнесены к расчётным. Удельные выбросы рассчитаны только по измеренным значениям и только для АЭС с одним типом реакторов. Поэтому

Ленинградская и Нововоронежская АЭС, где работают реакторы разных типов, не рассматривались. Взят период 2022–2024 гг., так как в 2025 г. на Курской АЭС начал работу блок ВВЭР-ТОИ. Годовой выброс делился на суммарную электрическую мощность работавших в этот год блоков. Результаты вместе с расчётными значениями Смоленской и Балаковской АЭС приведены в табл.

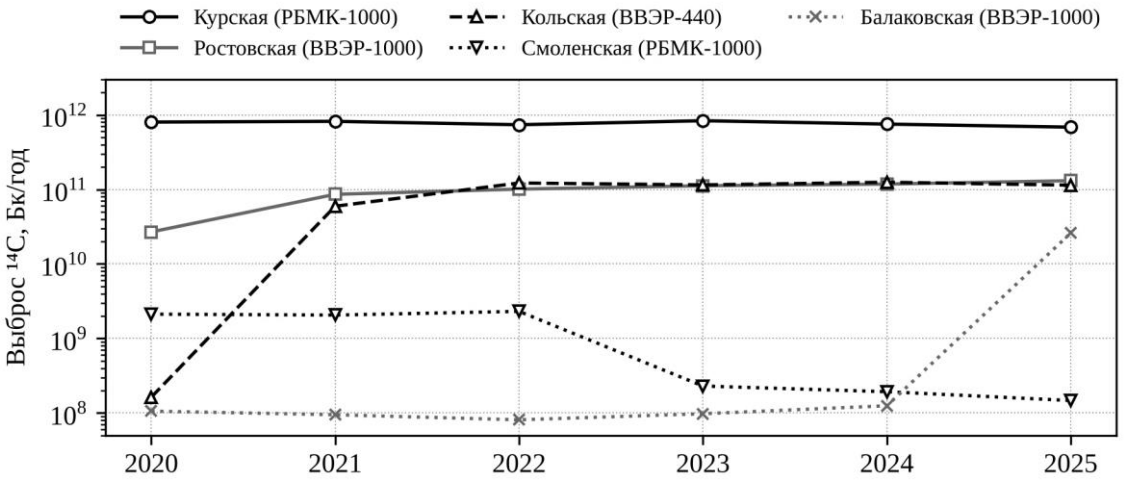


Рис. Годовые выбросы ^{14}C в атмосферу по данным [3–5]

Таблица

Удельные выбросы ^{14}C, среднее за 2022–2024 гг. [4, 5]

АЭС	Реакторы	Удельный выброс ^{14}C, 10^9 Бк/(ГВт·год)
Измеренные значения		
Курская	2–3 × РБМК-1000	300
Кольская	4 × ВВЭР-440	69
Ростовская	4 × ВВЭР-1000	28
Белоярская	БН-600, БН-800	0,74
Значения, отнесённые к расчётным (½ НПИ)		
Смоленская	3 × РБМК-1000	0,30
Балаковская	4 × ВВЭР-1000	0,025

По измеренным значениям больше всего ^{14}C выбрасывают реакторы РБМК-1000, меньше всего – БН. У РБМК-1000 удельный выброс в 11 раз выше, чем у ВВЭР-1000, из-за дополнительного источника ^{14}C – азота в графитовой кладке. У реакторов БН он почти в 40 раз ниже, чем у ВВЭР-1000, так как теплоноситель первого контура у них – натрий, а не вода.

Расчётные значения Смоленской и Балаковской АЭС примерно в 1000 раз ниже измеренных удельных выбросов однотипных станций. Для одинаковых реакторов это трудно объяснить условиями эксплуатации; вероятнее, методика на этих АЭС не регистрирует основную часть ^{14}C. Одна из возможных причин – химическая форма. На АЭС Пакш с реакторами ВВЭР-440 более 95 % ^{14}C выбрасывается в виде углеводородов

и около 4 % – в виде CO_2 [6]. Если методика улавливает только CO_2, большая часть ^{14}C в измерение не попадает. С этим согласуется и то, что удельный выброс АЭС Пакш ($7{,}4 \cdot 10^{11}$ Бк/(ГВт·год) [6]) в 11 раз выше, чем у Кольской АЭС с теми же реакторами.

Полученные удельные выбросы можно использовать для оценки выброса ^{14}C там, где он не измерен. Для Смоленской АЭС оценка по удельному выбросу РБМК-1000 даёт около $9 \cdot 10^{11}$ Бк/год вместо опубликованных $2 \cdot 10^{8}$ Бк/год, для Балаковской АЭС по удельному выбросу ВВЭР-1000 – около $1 \cdot 10^{11}$ Бк/год вместо $1 \cdot 10^{8}$ Бк/год.

Заключение. По данным радиационного мониторинга за 2022–2024 гг. удельные выбросы ^{14}C составили: для РБМК-1000 – $3{,}0 \cdot 10^{11}$, для ВВЭР-440 – $6{,}9 \cdot 10^{10}$, для ВВЭР-1000 – $2{,}8 \cdot 10^{10}$, для БН – $7{,}4 \cdot 10^{8}$ Бк/(ГВт·год). Расчётные значения по половине НПИ примерно в 1000 раз ниже измеренных выбросов однотипных АЭС, поэтому для ^{14}C они не дают оценки сверху. При расчёте доз вместо них обоснованнее брать удельный выброс однотипной АЭС. Значение для ВВЭР-440 на порядок ниже, чем на АЭС Пакш; чтобы сравнение было корректным, в отчётности стоит указывать, какая химическая форма ^{14}C учитывается при контроле выбросов.

Список литературы

1. Спиридонов, С. И. К вопросу об оценке соблюдения квоты на облучение населения от газоаэрозольных выбросов АЭС / С. И. Спиридонов, Р. А. Микаилова, В. Э. Нуштаева // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2021. – Т. 61, № 6. – С. 664–670. – DOI 10.31857/S0869803121060114. – EDN MZAEZW.
2. Мукушева, М. К. Анализ характеристик радиоактивных выбросов АЭС с разными типами реакторов при штатном функционировании и для сценариев проектных и запроектных аварий / М. К. Мукушева, С. И. Спиридонов, Р. А. Микаилова // Вестник НЯЦ РК. – 2024. – № 3. – С. 74–82. – DOI 10.52676/1729-7885-2024-3-74-82.
3. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году: ежегодник / редкол.: В. М. Шершаков [и др.]. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2022. – 342 с. – URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2021.pdf (дата обращения: 06.10.2026).
4. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2023 году: ежегодник / редкол.: В. С. Косых [и др.]. – Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2024. – 335 с. – URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2023.pdf (дата обращения: 06.10.2026).
5. Радиационная обстановка на территории России в 2025 году : ежегодник / редкол.: В. М. Шершаков [и др.]. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2026. – 333 с. – URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2025.pdf (дата обращения: 06.10.2026).
6. Hertelendi, E. ^{14}C release in various chemical forms with gaseous effluents from the Paks nuclear power plant / E. Hertelendi, G. Uchrin, P. Ormai // Radiocarbon. – 1989. – Vol. 31, No. 3. – P. 754–761. – DOI 10.1017/S0033822200012352.

Теоретическая и экспериментальная физика

УДК 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Агекян К.А., Буранов Р.В., Ивахненко Н.Н., канд. физ.-мат. наук, доц.,
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, РФ
buranov.roman2015@gmail.com

Введение. Исследование процессов теплопереноса в неоднородных пористых средах с учётом фазовых переходов представляет значительный интерес для широкого круга прикладных задач, связанных с мелиорацией, строительством, природообустройством и эксплуатацией инженерных сооружений в условиях сезонного промерзания-оттаивания грунтов. Наличие включений с теплофизическими свойствами, отличными от свойств окружающей матрицы, а также присутствие влаги, способной к фазовым превращениям, существенно усложняют математическое описание таких процессов и требуют применения эффективных численных методов.

Математическое моделирование тепловых процессов в гетерогенных средах с фазовыми переходами имеет длительную историю развития. Классические подходы, основанные на решении задачи Стефана, хорошо зарекомендовали себя для однородных сред, однако в случае неоднородных структур возникает необходимость учёта пространственной изменчивости теплофизических характеристик и связанной с этим нелинейности задачи. Современные численные методы позволяют эффективно решать такие задачи на основе конечно-разностных и конечно-элементных схем с явным или неявным выделением фронта фазового перехода.

Основная часть. Рассматривается двумерная задача теплопереноса в прямоугольной области, содержащей включения (неоднородности) произвольной геометрической формы. Математическая модель процесса описывается нелинейным уравнением теплопроводности с эффективной теплоёмкостью, учитывающей скрытую теплоту фазового перехода:

$$C_{eff}(T)\partial T/\partial t = \nabla \cdot (\lambda(T)\nabla T),$$

где $C_{eff}(T)$ – эффективная объёмная теплоёмкость, учитывающая как истинную теплоёмкость среды, так и теплоту фазового перехода в интервале температур; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, зависящий от температуры и пространственной координаты в силу неоднородности среды.

Для численного решения использована конечно-разностная схема с неявным выделением фронта фазового перехода на основе метода

эффективной теплоёмкости. Пространственная дискретизация выполнена на равномерной сетке с использованием пятиточечного шаблона для оператора Лапласа. Нелинейность задачи разрешается итерационным методом на каждом временном шаге.

Граничные условия соответствуют конвективному теплообмену с окружающей средой на внешних границах области. Начальное распределение температуры задаётся в соответствии с типичными условиями сезонного промерзания грунта.

Численные эксперименты проведены для различных значений коэффициента теплопроводности включений (в диапазоне от 0,5 до 5,0 Вт/(м·К)) и интенсивности фазового перехода (скрытой теплоты плавления). В качестве базовой среды рассматривался влажный суглинок, в качестве включений – гравийные и песчаные линзы, а также области с повышенной влажностью.

Результаты и обсуждение. Анализ полученных результатов показал, что наличие неоднородностей приводит к существенному искажению температурного поля по сравнению с однородной средой. В частности, включения с повышенной теплопроводностью (например, гравийные линзы) способствуют более быстрому распространению тепла вглубь массива, что приводит к ускоренному оттаиванию нижележащих слоёв и замедлению продвижения фронта промерзания. Напротив, включения с пониженной теплопроводностью (например, сухие песчаные линзы) действуют как тепловые барьеры, локализуя тепловые потоки и создавая зоны с существенно различающимися температурными градиентами.

Установлено, что при определённых соотношениях теплофизических параметров среды и включений возможно формирование так называемых тепловых «каналов» – областей, по которым теплота распространяется значительно быстрее, чем в окружающей среде. Это явление имеет важное практическое значение, поскольку такие каналы могут приводить к неравномерному промерзанию-оттаиванию грунтов и, как следствие, к неравномерным деформациям инженерных сооружений.

Кроме того, выявлено влияние скрытой теплоты фазового перехода на динамику температурного поля. Увеличение скрытой теплоты приводит к замедлению продвижения фронта фазового перехода и более плавному изменению температуры в зоне фазовых превращений. Это необходимо учитывать при оценке времени оттаивания и промерзания грунтов в реальных условиях.

Заключение. Разработанная численная модель позволяет проводить оценку динамики тепловых процессов в неоднородных средах с учётом фазовых переходов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем регулирования теплового режима грунтов, а также при решении задач, связанных с оценкой устойчивости инженерных сооружений в условиях сезонного промерзания-оттаивания.

Дальнейшее развитие работы предполагает учёт трёхмерности задачи, а также более сложных сценариев распределения неоднородностей и нестационарных граничных условий. Перспективным направлением является также верификация модели на основе данных натурных наблюдений.

Список литературы

1. Ивахненко Н. Н. Анализ процессов массопереноса с реакцией в неоднородных пористых средах / Н. Н. Ивахненко, М. Ю. Бадекин, Д. М. Бенин [и др.] // Природообустройство. – 2025. – Вып. 5. – С. 92–98. – DOI 10.26897/1997-6011-2025-5-92-98.
2. Ивахненко Н. Н. Базовый курс физики. Механика / Н. Н. Ивахненко, М. Ю. Бадекин, Н. А. Коноплини и др. – М.: РГАУ-МСХА, 2023. – 201 с.
3. Донской И. Г. Численное моделирование процесса плавления цилиндрического образца с локальным источником тепла / И. Г. Донской // iPolytech Journal. – 2025. – № 4. – С. 563–572. – DOI 10.21285/1814-3520-2025-4-563-572.
4. Марков С. И. Многомасштабный метод Галёркина для математического моделирования процессов теплопроводности с фазовыми переходами в неоднородных средах / С. И. Марков, Е.П. Шурина, Н. Б. Иткина // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Т. 1333. – 032052. – DOI 10.1088/1742-6596/1333/3/032052.
5. Пешынска М. Апскейлинг расширенной гетерогенной задачи Стефана от масштаба пор к масштабу Дарси в вечной мерзлоте / М. Пешынска, Н. Вохра, Л. Биглер // Multiscale Modeling & Simulation. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 436–476. – DOI 10.1137/23M1552197.

УДК 537.622.4:543.572.3

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБОЛЕГИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ ФЕРРИТА ВИСМУТА: ПО ДАННЫМ ДСК

Антонишин Я.Ю.,
Тарасенко Т.Н., канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0002-3258-8174,
Ковалёв О.Е., ORCID 0009-0009-0472-515X
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
antonishyn.yaroslav@yandex.ru

Один из самых известных мультиферроиков – феррит висмута $BiFeO_3$, который при комнатной температуре обладает как антиферромагнитным (АФМ), так и ферроэлектрическим упорядочением [1]. Известно, что $BiFeO_3$ имеет пространственно-модулированную спиновую структуру (циклоиду) с периодом 62 нм, несоразмерную периоду кристаллической решетки, поэтому в нём отсутствует линейный магнитоэлектрический эффект, а существует только более слабый –

квадратичный [2]. Вследствие несоразмерности периода циклоиды периоду кристаллической решетки, в $BiFeO_3$ отсутствует линейный магнитоэлектрический эффект, а существует только более слабый – квадратичный. Замещение висмута и/или железа может изменить структурные и магнитные свойства, при этом происходит подавление циклоиды и улучшаются магнитные свойства «чистого» феррита висмута.

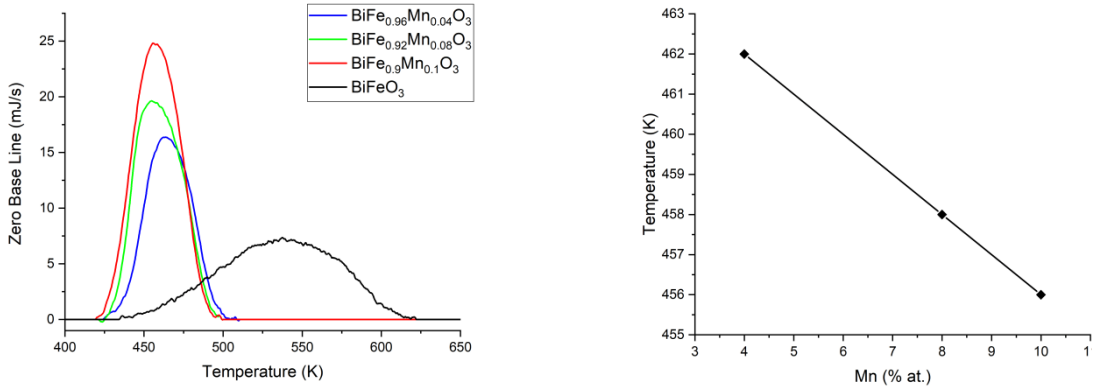
В данной работе, являющейся продолжением исследований свойств мультиферроиков $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.1$), синтезированных золь-гель методом [3], была изучена взаимосвязь между магнитным состоянием и тепловыми характеристиками соединений в зависимости от степени их замещения. Химическое замещение ионов Fe^{3+} на ионы Mn^{3+} в $BiFeO_3$ приводит к снижению температуры возникновения ферромагнитной (ФМ) фазы [4], которая сосуществует с АФМ фазой. При этом АФМ фаза частично трансформируется в слабоферромагнитную (СФМ) фазу, которая дает вклад в суммарный магнитный момент, обусловленный локальными ФМ сверхобменными взаимодействиями ионов Mn^{3+}-O^2-Fe^{3+} и Mn^{3+}-O^2-Mn^{3+}. Для крайнего состава – манганита висмута $BiMnO_3$ характерно орбитальное упорядочение ионов Mn^{3+}, обусловливающее его ферромагнетизм [5]. Однако локальные магнитные неоднородности, вызванные слабым легированием марганцем, уже могут иметь ФМ упорядочение.

Изученные в данной работе составы системы $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.1$), полученные золь-гель методом, исследованы рентгеноструктурным методом. Результаты исследования выявили, что все образцы имеют ромбоэдрически искаженную структуру перовскита ABO_3 (пр. гр. *R*3*c*). Однако с ростом концентрации ионов марганца Mn^{3+}, замещающих ионы железа Fe^{3+} в В-позициях, в кристаллической структуре Mn-содержащих составов снижается количество ромбоэдрических искажений структуры перовскита и проявляются искажения орторомбического типа (пр. гр. *Pbnm*) в виде постепенного слияния некоторых расщепленных рефлексов. Ионы Mn^{3+}, являясь ян-теллеровскими ионами, вызывают искажения кислородных октаэдров, что сопровождается понижением симметрии кристаллической решётки и появлением второй фазы. В работе [3] показано, что в мультиферроиках $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.1$) в диапазоне комнатных температур происходит частичный переход из ромбоэдрической в орторомбическую фазу, и наблюдается их сосуществование в данном диапазоне.

Термограммы порошковых составов, которые прошли термообработку при 730 К, снимались на совмещенном термическом анализаторе с высоким разрешением Linseis (модель STA PT 1600) со скоростью нагрева V = 10 K/min. Температурную шкалу калибровали по точке плавления индия (429,7485 К), а тепловой эффект – по энтальпии плавления индия (ΔH_f = 28,57 Дж/г).

На рисунке (а, б) показаны результаты проведенного исследования тепловых характеристик $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ методом ДСК. Здесь отчетливо

видна зависимость положения максимумов от температуры. Смещение максимумов с ростом содержания марганца происходит в сторону понижения температуры. Для составов x= 0.04; 0.08 и 0.10 они находятся в узком диапазоне $456 \leq T \leq 462$ К в отличие от $BiFeO_3$, который имеет уширенный максимум при 543К. На рис.,б показана концентрационная зависимость температуры максимумов сигнала ДСК. Данные максимумы на термограммах ($420K < T < 500K$) не являются температурами магнитных фазовых переходов (АФМ-ПМ), потому что для как для «чистого» $BiFeO_3$, так и для легированных $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ они имеют более высокие значения (для $BiFeO_3$, $T_N = 640$ K) [6].



а) б)

Рис.
а) Температурная зависимость сигнала ДСК для $BiFe_{1-x}MnxO3$ ($0.0 \leq x \leq 0.1$);
б) концентрационная зависимость максимумов сигнала ДСК

В работе [7] при изучении магнитоэлектрических свойств поляризованных однофазных керамических соединений $BiFeO_3$, слабозамещенных самарием, показано, что в этом диапазоне температур (при ~474 K) существует аномалия диэлектрической проницаемости, обусловленной магнитоэлектрической связью, когда угол скоса наклонного АФМ порядка уменьшается до нуля и исчезает пространственно-модулированная спиновая структура.

Таким образом, замещение в $BiFeO_3$ ионов Fe^{3+} ионами Mn^{3+} приводит к разрушению образованной ионами Fe^{3+} спиновой циклоиды, что стабилизирует неколлинеарную АФМ структуру, сопровождающейся появлением слабого ферромагнетизма с ненулевой остаточной намагниченностью в составах с $0,04 < x < 0,10$.

Эти составы представляют интерес для разработки функциональных материалов и устройств для магнитооптики, спинтроники и т.д.

Список литературы

1. Пятаков А. П. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики / А. П. Пятаков, А. К. Звездин // Успехи физ. наук. – 2012. – Т. 182, № 6. – С. 593-620. doi.org/10.3367/UFNr.0182.201206b.0593.

2. Sosnowska I. Origin of the long period magnetic ordering in BiFeO3 / I. Sosnowska; A.K. Zvezdin // J. Magn. Magn. Mater. – 1995. – V.140–144. – P. 167–168. DOI 10.1016/0304-8853(94)01120-6.
3. Тарасенко Т. Н. Структурные и магнитные характеристики твердых растворов мультиферроиков $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ ($0.0 \le x \le 0.1$), полученных золь-гель методом / Т. Н. Тарасенко, Г. К. Волкова, Р. А. Сафонов и др. // ФТВД. – 2025. – Т. 35, № 3. – С. 60-68.
4. Тарасенко Т. Н. Роль замещений марганцем катионов железа в изменении магнитных и электрических характеристик магнитоэлектриков $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ (x=0.05 и 0.15) / Т. Н. Тарасенко, В. И. Михайлов, З. Ф. Кравченко и др. // Изв. РАН. Сер. физ. – 2023. – Т. 87, №. 3. – С. 412-416. DOI: 10.31857/S0367676522700727, EDN: HGNMYZ.
5. Atou T. Structure Determination of Ferromagnetic Perovskite $BiMnO_3$ / T. Atou, H. Chiba et al. // J. Solid State Chem. – 1999 – V. 145. – P. 639-642. DOI: 10.1006/jssc.1999.8267.
6. Chen L. The local distortion and electronic behavior in Mn doped $BiFeO_3$ / L. Chen, L. Zheng, et al. // J. Alloys and Comp. – 2015. – V. 633. – P. 216-219. doi.org/10.1016/j.jallcom.
7. Yuan G. L. Multiferroicity in polarized single-phase $Bi_{0.875}Sm_{0.125}FeO_3$ ceramics / G. L. Yuan, S. W. Or // J. Appl. Phys. – 2006. – 100. – 024109. DOI: 10.1063/1.2220642.

УДК 538.911

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ТОПОЛОГИЧЕСКИ УПОРЯДОЧЕННЫХ СЛОИСТЫХ СРЕДАХ С ПРИМЕСНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ СЛОЯМИ

***Безус А.В.*[1],** канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0009-0003-0865-6194,
***Безус Ю.А.*[1,2],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0002-2385-0441,
***Федоров С.А.*[2],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0009-0006-5587-425X
[1]ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
[2]ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
a.bezus@mail.ru, paladyan0108@yandex.ru

Введение. Исследование распространения электромагнитных волн в слоистых кристаллических средах в последние годы привлекает значительный интерес. В [1] представлен анализ фотонных кристаллов, сформированных на основе кремния и жидких кристаллов (ЖК), тогда как [2-3] изучают прохождение света в композитах, содержащих плазменные прослойки, а также особенности формирования фотонных запрещенных зон в плазменных фотонных кристаллах с алмазоподобной геометрией. Актуальность подобных систем обусловлена не только их важностью для современной электроники, но и развитием технологий, позволяющих создавать ультратонкие пленки и периодические структуры с контролируемыми параметрами, которые могут существенно изменять фотонный спектр и открывают возможности для создания фильтров и сенсоров [1-3].

Целью работы является исследование влияния случайно включенных плазменных слоев на фотонный спектр одномерной сверхрешетки, а также показать, что примесные слои существенно изменяют ширину фотонной запрещенной зоны, а в сверхрешетке SiO_2/Si могут полностью ее подавлять, превращая структуру в частотный фильтр.

Основная часть. В настоящей работе используется приближение виртуального кристалла [4], основанное на конфигурационном усреднении, для описания поляритонов в макроскопически неоднородной среде. Использование этой аппроксимации для описания изменения поляритонного спектра в простой сверхрешетке является базовым шагом к изучению более сложных и несовершенных структур.

В работе исследуется одномерная сверхрешетка, представляющая собой макроскопически однородную слоистую среду – топологически упорядоченный ансамбль (например, системы Si/ЖК или SiO_2/Si), в который случайным образом включаются примесные плазменные слои (рис. 1).

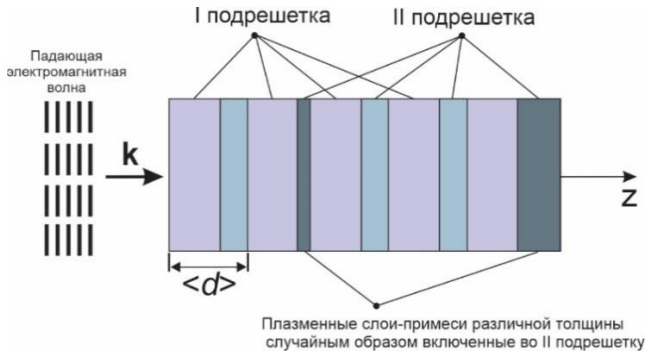


Рис. 1. Двухподрешеточная сверхрешетка со случайно включенными (во вторую подрешетку) примесными слоями

Материал задается периодическими функциями диэлектрической и магнитной проницаемости: $\hat{\varepsilon}(x,y,z) = \hat{\varepsilon}(x,y,z+d)$, $\hat{\mu}(x,y,z) = \hat{\mu}(x,y,z+d)$, где d – период сверхрешетки. Каждый слой имеет собственную толщину, а вся структура ориентирована вдоль оси z.

Материальные тензоры такой неидеальной сверхрешетки описываются случайными величинами. После конфигурационного усреднения трансляционная симметрия системы фактически «восстанавливается», что позволяет получить систему уравнений, определяющих нормальные моды электромагнитных волн, распространяющихся в одномерной квазипериодической среде.

Для волны, распространяющейся вдоль оси z, существенными оказываются только две гармоники: $p = 0$ и $p = -1$. Это приводит к системе из двух уравнений, определяющих дисперсионное соотношение:

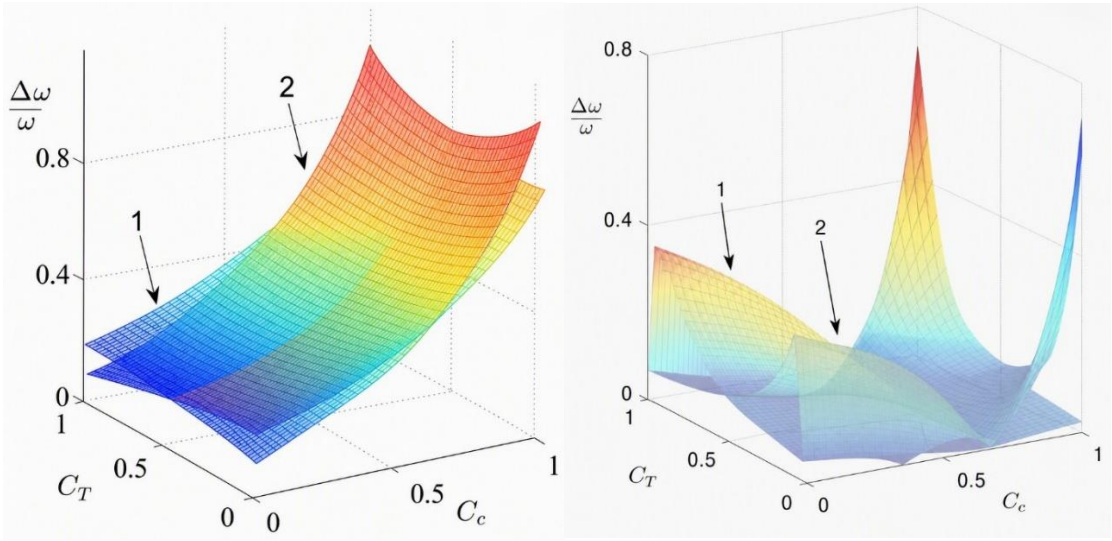
$$\begin{vmatrix} k^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_0 & \frac{k}{d}\frac{2\pi}{c^2}\varepsilon_{+1} \\ \frac{k}{d}\frac{2\pi}{c^2}\varepsilon_{-1} & (k-2\pi/d)^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_0 \end{vmatrix} = 0,$$

где k – волновой вектор Блоха. Корни этого соотношения дают границы фотонной запрещенной зоны: $\omega_-(k)$, $\omega_+(k)$. Если частота попадает в диапазон $\omega_-(k) < \omega < \omega_+(k)$, то корни становятся комплексными, волна затухает, что свидетельствует о брэгговском отражении. Вне этого диапазона волна проходит через структуру.

В качестве иллюстрации подхода рассмотрено распространение электромагнитных возбуждений в двух типах одномерных сверхрешеток Si/ЖК и SiO_2/Si, каждая из которых содержит два слоя в элементарной ячейке. Для первой системы использованы значения диэлектрических проницаемостей ε_1= 11.7 и ε_2 = 5.5, для второй – ε_1 = 3.7 и ε_2 = 11.7.

Чтобы смоделировать влияние дефектов, предполагается, что слои второго подрешетки случайным образом заменяются плазменными слоями. Концентрации, толщины и диэлектрические проницаемости матричных слоев обозначаются как $C^{(1)}, a^{(1)} = a_1, \varepsilon^{(1)} = \varepsilon_1$и $C^{(2)}, a^{(2)}, \varepsilon^{(2)} = \varepsilon_2$. Параметры плазменных слоев – $C_c, C_T, a^{(2)}$и $\varepsilon^{(2)}$.

На рисунке 2А представлена зависимости $\Delta\omega(C_c, C_T)$ для Si/ЖК при двух наборах относительных толщин слоев. На рисунке 2Б аналогичная зависимость показана для системы SiO_2/Si.



А Б

Рис. 2. Зависимость ширины фотонной запрещенной зоны $\Delta\omega/\omega$ от концентрации примесных плазменных слоев C_c и их относительной толщины C_T для двух различных одномерных сверхрешеток: Si/ЖК (А) и SiO_2/Si (Б)

Заключение. Примесные плазменные слои существенно изменяют фотонный спектр сверхрешетки. В системе Si/ЖК запрещенная фотонная зона сохраняется при любых концентрациях плазмы. В случае же SiO_2/Si возможно полное исчезновение фотонной запрещенной зоны, что превращает исследуемую структуру в частотный фильтр. Такое поведение спектра обусловлено контрастом показателей преломления и толщинами примесных слоев. Это приводит к различной степени нарушения периодичности и, соответственно, к различному влиянию на фотонный спектр.

Список литературы

1. Vetrov S. Ya. Peculiarities of spectral properties of a one-dimensional photonic crystal with an anisotropic defect layer of the nanocomposite with resonant dispersion / S. Ya. Vetrov, P. S. Pankin, I. V. Timofeev // Quantum Electron. – 2014. – Vol. 44, №9. – P. 881-884. – DOI 10.1070/QE2014v044n09ABEH015473.
2. Gunyakov V. A. Modulation of defect modes intensity by controlled light scattering in a photonic structure with a liquid-crystal component / V. A. Gunyakov, M. N. Krakhalev, V. Ya. Zyryanov [et al.] // Tech. Phys. Lett. – 2015. – Vol. 41. – P. 86-89. – DOI 10.1134/S1063785015010241.
3. Zhang H. Analysis of photonic band gap in dispersive properties of tunable three-dimensional photonic crystals doped by magnetized plasma / H. Zhang, S. Liu, X. Kong, C. Chen [et al.] // Phys. Plasmas. – 2013. – Vol. 20. – P. 042110. – DOI 10.1063/1.4798523.
4. Rumyantsev V. Propagation of electromagnetic radiation through a one-dimensional superlattice doped with impurity plasma layers / V. Rumyantsev, S. Fedorov, K. Gumennyk [et al.] // Optik. – 2016. – Vol. 127. – P. 3343-3346. – DOI 10.1016/j.ijleo.2015.12.097.

УДК 546.471.2.539.23

ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ И КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

Василенко Н.А., канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0000-0001-5705-1018
Северодонецкий технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. Владимира Даля», г. Северодонецк, ЛНР, РФ
Natalia-Vasilenko.73@yandex.com

Введение. Ионно-плазменное распыление широко применяется при нанесении различного вида покрытий. Экспериментально установлено, что режим распыления мишени влияет на получаемые пленки. Так, в работах [1; 2] при магнетронном распылении ниобия, изменение давления аргона вызывало изменение величины температуры перехода пленок в сверхпроводящее состояние. В статье [3], величина приложенной ВЧ мощности и парциальное давление аргона влияли на оптические и электрические свойства пленок, полученных методом нереактивного ВЧ распыления мишени $ZnO:Al_2O_3$. Особенно сильно влияние режима распыления сказывается при распылении многокомпонентных мишеней [4].

Цель. Изучить данные по изменению скорости роста пленок и их состава в зависимости от давления рабочего газа (Ar) и расстояния мишень – подложка. Предпринять попытку объяснения этого влияния.

Основная часть. Все пленки осаждались при помощи ВЧ магнетронного распыления [5] мишени ZrB_2, полученной спеканием порошков. Время нанесения составляло 15-60 мин. В качестве подложек использовались монокристаллический Si (111), кристаллы NaCl,

ситалловые пластинки. Давление рабочего газа варьировалось в основном от 0,18 до 0,65 Па при неизменной ВЧ мощности (200 Вт). Максимальное давление остаточных газов составляло $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ Па. Расстояние мишень – подложка составляло 210 и 140 мм. Толщины пленок определялись методом многолучевой интерференции (МИИ-4) и гравиметрически (ВЛА-200г-М). Фазовый состав определялся методами рентгеновской дифракции (ДРОН-4) и электронной микроскопии (УЭМВ-100 АК).

Зависимость толщины пленки от давления рабочего газа для времени нанесения 30 мин, представлена на рисунке 1. Аналогичного вида кривые получены и для других времен нанесения. Скорость роста пленки при каждом фиксированном давлении, оставалась постоянной. Как видно из рисунка 1, существует некое значение давления аргона $p_м$, при котором скорость роста максимальна (отмечены пунктиром), причем при различных расстояниях d (мишень-подложка) произведение $p_м d$ = const = = 88.2 Па·мм.

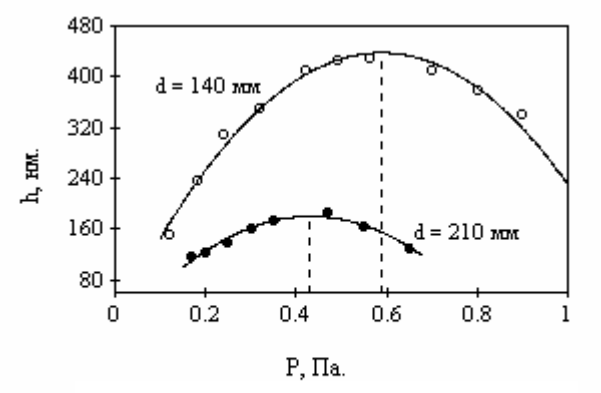


Рис. 1. Зависимость толщины пленки от величины давления рабочего газа

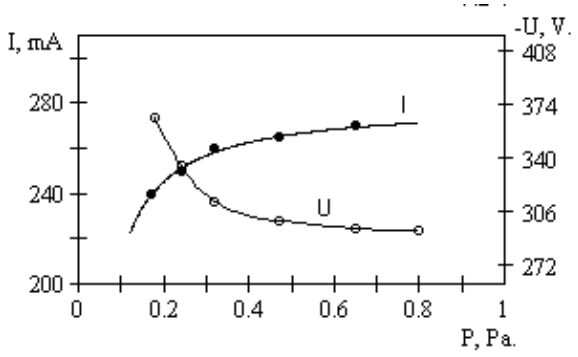


Рис. 2. Изменение ВАХ разряда В зависимости от величины давления аргона при d = 210 мм

На рисунке 2 показано изменение вольт-амперной характеристики разряда при изменениях давления Ar. На основе анализа условий нанесения можно заключить, что толщина пленки в данном эксперименте лимитируется преимущественно эффективностью переноса распыленного вещества к поверхности конденсации. Оценим влияние этих условий, приняв следующие допущения: распыленный материал мишени представлен преимущественно атомами, выходящими нормально к поверхности; концентрация распыленных атомов на несколько порядков ниже концентрации атомов аргона, а их начальная энергия ε_0 по порядку величины совпадает с поверхностной энергией связи и составляет 2–10 эВ [6]; атомы, приходящие к поверхности конденсации с энергией $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$, не адсорбируются, а отражаются от ее поверхности, за величину $\varepsilon_{кр}$ можно принять температуру кипения вещества; величина потока распыления j_0 из поверхности мишени практически низменна и не зависит от давления рабочего газа.

При этих допущениях, для описания движения атомов применимы газокинетическое приближение и модель твердых шаров, к тому же, если скорость распыленного атома значительно превосходит тепловые скорости атомов среды, можно использовать приближение неподвижных атомов газа.

Структурные исследования для образцов, полученных на NaCl и Si, при d = 210 мм, показали, что при давлениях аргона от 0,15 до 0,32 Па пленки являются двухфазными, состоящими из текстурированного ZrB_2 и небольшого количества ZrO_2. Скорость их роста составляла порядка 5,0 нм/мин. Также двухфазные пленки аналогичного состава были получены и в диапазоне 0,5–0,65 Па; однако здесь преобладали оксиды, скорость роста в этом диапазоне давлений ≈ 6 нм/мин. При средних значениях давлений получены пленки, состоящие из четырех фаз: ZrB_2, ZrB, ZrO_2 и B_2O_3, скорость роста ≈ 6,5 нм/мин. При давлении 1,2 Па и d = =140 мм, пленки были трехфазными, состоящими из небольшого количества текстурированных ZrB_2 и ZrO_2, остальное – высокодисперсный текстурированный Zr. Наличие сравнительно большого количества оксидов, вероятно, объясняется недостаточной чистотой рабочего газа.

Заключение. При нанесении покрытий с использованием ионно-плазменного распыления мишени (особенно в случае многокомпонентных мишеней) существенное влияние на скорость роста, состав и структуру получаемых пленок оказывают давление рабочего газа и расстояние переноса распыленного вещества. При этом, руководствуясь изложенными соображениями, можно выделить примерные области давлений, в которых фазовый и элементный составы меняются довольно слабо.

Влияние условий переноса вещества мишени к поверхности конденсации подтверждается постоянством произведения $p_м d$ в максимумах толщин пленок, наличием более острого максимума толщины при уменьшении расстояния d, составом полученных пленок.

Для более детального выяснения механизма и степени влияния условий переноса на скорость роста состав и структуру пленок необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Список литературы

1. Лебедева, Т. С. Разработка системы экспресс-контроля методом анодной спектроскопии для тонкопленочных технологий / Т. С. Лебедева, С. Я. Навала, П. Б. Шпилевой // Труды третьего международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование» (ISVTE-3). – Харьков, Украина, 22-24 сентября 1999 г. – С. 222-226.
2. Vojtovich, I. D. Express-Control of Thin-Film SQUID Production by Anodization Spectroscopy / I. D. Vojtovich, Y. S. Kolesnik, T. S. Lebedeva, S. J. Navala // Applied Superconductivity. – 1993. – Vol. 2. – P. 1323-1326.
3. Бойко, Б. Т. Электрические и оптические свойства пленок ZnO:Al, полученных методом магнетронного распыления без нагрева подложки /

Б. Т. Бойко, Г. С. Хрипунов, Г. В. Юрченко // Труды третьего международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование» (ISVTE-3). – Харьков, Украина, 22-24 сентября 1999 г. – С. 250-254.
4. Запороженко, В. И. Преимущественное распыление. Обзор результатов экспериментальных исследований / В. И. Запороженко, М. Г. Степанова // РАН. Поверхность. Серия: Физика, химия, механика. – 1994. – №8-9. – С. 5-17.
5. Гончаров, А. А. Высокочастотная магнетронная распылительная система на базе установки УВН-75Р3 / А. А. Гончаров, В. В. Петухов, Д. Н. Терпий и др. // ВАНТ, Харьков. – 1998. – № 5(6)-6(7). – С. 57-58.
6. Кристя, В. И. Моделирование взаимодействия поверхности твердого тела с плазмой тлеющего разряда и разработка физических основ прогнозирования свойств холодных катодов: диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук: 01.04.07. – Калуга, 1996. – 243 с. – Текст: непосредственный.

УДК 669.788:539.37

СИСТЕМЫ МЕТАЛЛ-ВОДОРОД: ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ

Глухова Ж.Л., канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0000-0002-5139-7816
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, РФ,
zhglukhova@yandex.ru

Введение. Повышенный интерес к проблемам взаимодействия водорода с металлами связан с развитием водородной энергетики и водородных технологий. Современные технологии получения и обработки материалов [1-3] основаны на различных воздействиях и соответствующих им полях: тепловое воздействие и температурные поля (термическая обработка); силовое воздействие и поля механических напряжений (обработка давлением); воздействие физическими полями (магнитным, электрическим, электромагнитным); воздействие потоками частиц (имплантационная обработка). Как при исходной обработке, так и при последующей эксплуатации материалы одновременно подвергаются двум (или более) физическим воздействиям. Поэтому при проектировании современных приборов и конструкций различного назначения возникает необходимость исследования их работы в условиях напряженно–деформированного состояния и характера распределения температурного или концентрационного полей в конструкции с учетом взаимного влияния термоупругих и водородоупруих полей.

Цель настоящей работы – обобщить результаты исследования различных проявлений сопряженных явлений в системах металл-водород и их математического описания.

Основная часть. Взаимосвязь различных физических воздействий на материалы обуславливает развитие сопряженных (перекрестных)

физических явлений. В результате физических воздействий на материалы формируются градиенты полей различной природы. Совокупность возможных перекрестных явлений и эффектов в системах металл-водород в неравновесных условиях, когда они подвержены водородному воздействию при одновременном температурном и механическом воздействиях, проанализирована и схематически представлена в виде диаграммы зависимости между механическими, концентрационными и тепловыми величинами [4]. Все перечисленные воздействия взаимообусловлены: любые изменения одного из них (градиентов концентрации водорода, температуры или механических напряжений) под влиянием изменений внешних или внутренних параметров системы вызывают немедленный отклик и появление градиентов двух других воздействующих факторов с последующим откликом фактора-провокатора. Для получения феноменологических соотношений между величинами и коэффициентами, необходимыми для описания сопряженных явлений, использован термодинамический подход. В [5] обобщены термодинамические основы явления водородоупругости и дано его математическое описание в неизотермических и изотермических условиях. Неизотермическая водородоупругость описана системой связанных нелинейных дифференциальных уравнений, отражающих взаимозависимость и взаимообусловленность эволюции концентрационных водородных полей, температурных полей и полей деформаций (напряжений). Изотермическая водородоупругость описана системой связанных нелинейных дифференциальных уравнений, учитывающих взаимозависимую и взаимообусловленную эволюцию концентрационных водородных полей и полей деформаций (напряжений) в условиях, когда можно пренебречь переносом тепла потоками водорода и изменениями температуры вследствие упругих деформаций и формоизменений. При этом в уравнении диффузии поток водорода в каждой точке системы Ме-Н определяется двумя движущими термодинамическими силами: градиентом концентрации водорода и градиентом внутренних напряжений. Данный подход учитывает возможность «восходящей» диффузии водорода в системах Ме-Н.

Полученное теоретическое описание водородоупругости было использовано для решения конкретных задач [6]. Разработаны математические модели таких водородоупругих эффектов как формоизменение металла и рассасывание концентрационных неоднородностей водорода. Для выполнения численных расчетов при решении вышеназванных задач водородоупругости разработано специализированное программное обеспечение. В результате численных расчетов получена картина пространственно-временного изменения концентрации водорода в бесконечной упругой среде при ее насыщении из шарообразной области, в которой поддерживается постоянная концентрация водорода. Также получены распределения концентрации водорода и их изменения по толщине пластины при одностороннем насыщении пластины водородом.

Анализ компьютерных расчетов показал, что водородоупругие напряжения существенно замедляют диффузионные процессы и увеличивают время жизни концентрационных неоднородностей водорода. Показано, что водородоупругая модель, основанная на уравнениях изотермической водородоупругости, более полно отражает особенности явления водородоупругости по сравнению с моделью, построенной по аналогии с термоупругостью.

Водородоупругая модель, основанная на использовании системы связанных нелинейных дифференциальных уравнений, достаточно хорошо описывает формоизменение консольно-закрепленной палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом и последующей эвакуации водорода из образца и позволяет объяснить ход временных зависимостей формоизменения (стрелы прогиба пластинки), зависимости максимального, обратимого и остаточного формоизменения от температуры и давления водорода в пределах области α-твердых растворов водорода в металлах. Показано, что одной из причин наблюдаемого остаточного формоизменения палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом является замедление диффузионного транспорта водорода водородоупругими напряжениями без выравнивания концентрации по толщине пластины за экспериментально разумные времена.

Заключение. На основе термодинамического подхода разработано математическое описание водородоупругости в изотермических и неизотермических условиях. Разработанная на его основе физико-математическая модель диффузионных процессов в системах металл-водород с учетом внутренних напряжений для исследования водородоупругих эффектов может использоваться для отработки режимов водородной обработки материалов, а также для оценки рисков при эксплуатации изделий, контактирующих с водородом (для расчета градиентов концентрации и напряжений с целью оценки предельных параметров эксплуатации электрофизической аппаратуры в водородосодержащих средах).

Список литературы

1. Гольцов В. А. Фундаментальные основы водородной обработки материалов / В. А. Гольцов // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 1. – С. 42–69. – EDN RXKMAN.
2. Солнцев Ю. П. *Водород в металлах и сплавах* / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, В. Ю. Пирайнен. – СПб.: Химиздат, 2002. – 240 с.
3. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И С. Полькин. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
4. Глухова, Ж. Л. О сопряженных явлениях при диффузии водорода в металлах / Ж. Л. Глухова // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2023. – № 1(82). – С. 62–68. – DOI 10.24412/0136-4545-2023-1-62-68. – EDN GXMRXU.
5. Гольцов В. А. Явление водородоупругости в системах металл-водород / В. А. Гольцов, Ж. Л. Глухова // Межд. научн. журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2014. – № 1(141). – С. 138-151. – EDN RXKMCF.

6. Глухова Ж. Л. Об учете упругих полей в диффузионных процессах водорода в металлах / Ж. Л. Глухова // Журнал теоретической и прикладной механики. 2024. – №3 (88). – С. 72-78. – DOI 10.24412/0136-4545-2024-3-72-78. – EDN OWBZBN.

УДК 539.374:536-12

О ГРАНИЦАХ ПРИМЕНИМОСТИ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Гордей М.М., ORCID 0009-0008-6187-0612,
Метлов Л.С., д-р физ.-мат. наук, проф., ORCID 0000-0003-2876-0768
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
gordei-maksim@mail.ru, lsmet@donfti.ru

Введение. Интенсивная пластическая деформация (ИПД) является эффективным методом получения ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. В процессе ИПД накапливаются дислокации и эволюционируют границы зёрен, что существенно изменяет механические и физические свойства материалов. Для описания таких процессов широко применяется подход неравновесной эволюционной термодинамики (НЭТ) [1-4], основанный на методе внутренних переменных [5]. Однако кинетические уравнения в этом подходе обычно постулируются, а границы применимости линейного приближения остаются недостаточно изученными. Поэтому представляет интерес аналитически вывести кинетические уравнения НЭТ и оценить пределы применимости линейного приближения при ИПД.

Основная часть. Предполагается, что состояние дислокационной подсистемы при низких температурах можно описывать только внутренней энергией $U(h)$, где h – плотность дислокаций, так как энтропийные эффекты слабы. Для ансамбля параллельных дислокаций с учётом дебаевского экранирования упругих полей [6] и корреляционного взаимодействия, следуя теории дислокаций [7], можно записать:

$$U(h) = \alpha h - \beta h \ln\frac{h}{h_0}, \qquad \beta = \frac{\mu b^2 \eta}{8\pi}, \qquad h_0 = \frac{T_{ext}}{\mu b^2 \eta r_0^2},$$

где μ – модуль сдвига, b – модуль вектора Бюргерса, η – фактор смешанных дислокаций, r_0 – радиус ядра, T_{ext} – внешний энергетический параметр. Уравнение баланса плотности дислокаций имеет вид

$$\dot{h} = G - R(h),$$

где G – скорость генерации, $R(h)$ – скорость аннигиляции. В стационарном состоянии $G = R(h_{st})$.

При малых отклонениях от стационарной плотности $\delta h = h - h_{st}$ скорость аннигиляции линеаризуется, и уравнение баланса принимает вид $\dot{h} = -R'(h_{st})\delta\mathrm{h}$. Для описания движения к стационарному состоянию введём вспомогательный потенциал $\Psi(h) = \Psi_0 - [U(h) - \varphi_e h]$, где $\varphi_e = U'(h_{st})$, и сопряжённая ему термодинамическая сила $X = U'(h) - \varphi_e$. Тогда кинетическое уравнение в линейном приближении записывается как

$$\dot{h} = \gamma X, \qquad \gamma = -\frac{R'(h_{st})}{U''(h_{st})} > 0.$$

Решение этого уравнения показывает, что возмущение затухает экспоненциально, если $U''(h_{st}) < 0$ и $R'(h_{st}) > 0$. Тем самым стационарное состояние асимптотически устойчиво.

В общем случае предполагается, что скорость изменения плотности дислокаций является гладкой функцией термодинамической силы: $\dot{h} = \Phi(U'(h) - \varphi_e)$, причём $\Phi(0) = 0$. При степенной аппроксимации $R(h) = kh^m$ и переходе к безразмерным переменным $x = h/h_0$, $\tau = Gt/h_0$ можно записать нелинейное уравнение

$$\frac{dx}{d\tau} = 1 - exp\left(-\frac{m}{\beta}(U' - \varphi_e)\right).$$

Вблизи стационара эта экспонента линеаризуется, и нелинейная модель переходит в линейную.

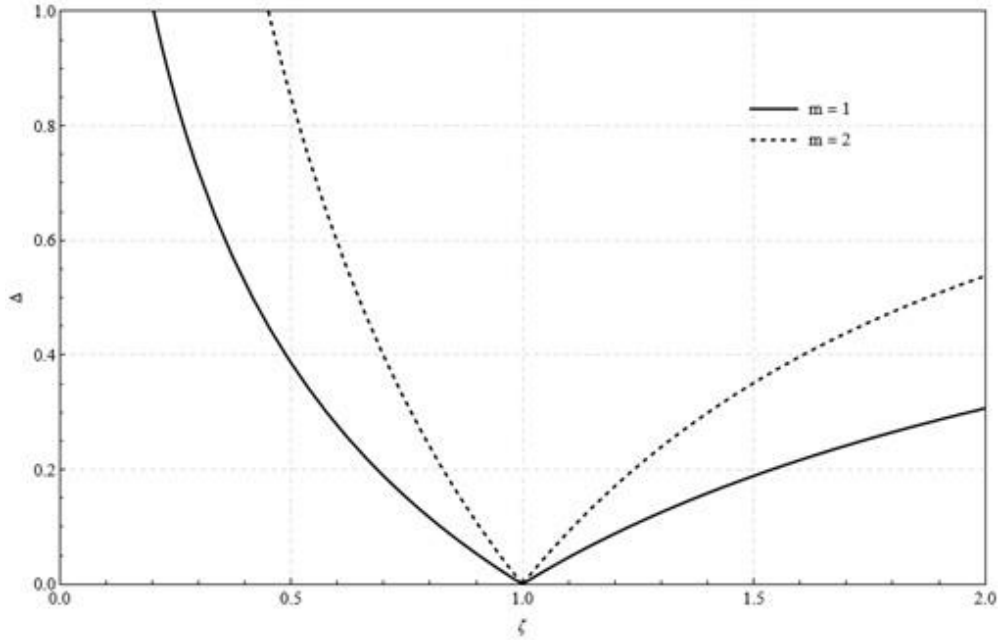


Рис. Зависимость относительной ошибки Δ от отношения плотности дислокаций к стационарной плотности ζ для m=1 (сплошная линия) и m=2 (штриховая линия)

Чтобы оценить применимость линейного приближения для описания эволюции дислокационной структуры, сравним обе модели, для чего посчитаем относительную ошибку, сделав замену $\zeta = \frac{x}{x_{st}}$. Величину относительной ошибки Δ будем определять по следующей формуле

$$\Delta = \left|1 + \frac{m\,ln\,\zeta}{1-\zeta^m}\right|, \quad \lim_{\zeta\to 1}\frac{m\,ln\,\zeta}{1-\zeta^m} = -1$$

Расчеты по этой формуле приведены на рис. Можем наблюдать интересное поведение функции $\Delta(\zeta)$, а именно асимметрию относительно стационара и сильное расхождение при $\zeta \to 0$. Рассмотрим именно этот случай, когда $\zeta \to 0$ (или $h \to 0$), а значит $dx/d\tau \to 1$. Нелинейная модель даёт $\dot{h} = G$, что физически корректно: при нулевой плотности дефектов аннигиляция отсутствует. Линейная же модель в этом пределе даёт неограниченный рост скорости, поскольку $U'(h) \to +\infty$.

Таким образом, линейная модель точно предсказывает стационарную плотность и устойчивость состояния, но завышает скорость накопления дислокаций при больших отклонениях от стационара.

Важно отметить, что уравнение, полученное линеаризацией в окрестности стационара h_{st} при $G > 0$, неприменимо для описания релаксации после снятия нагрузки. Причина в том, что параметр $\phi_e = U'(h_{st})$ определён через стационарную точку, которая существует только при $G > 0$.

Заключение. Аналитически получены кинетические уравнения НЭТ для эволюции дислокаций при ИПД. Показано, что эти уравнения являются следствием линеаризации балансных соотношений в окрестности стационарных состояний. Построена нелинейная модель, обеспечивающая более корректное поведение в пределе нулевой плотности.

Список литературы

1. Метлов, Л. С. Мегапластическая деформация сплавов в рамках неравновесной эволюционной термодинамики / Л. С. Метлов, М. М. Гордей, А. Г. Петренко // Физика и техника высоких давлений. – 2022. – Т. 32, № 1. – С. 37–47.
2. Metlov, L. S. Formation of the internal structure of solids under severe load / L. S. Metlov // Physical Review E. – 2010. – Vol. 81, № 5. – P. 051121. – DOI 10.1103/PhysRevE.81.051121.
3. Metlov, L. S. Nonequilibrium evolution thermodynamics of vacancies / L. S. Metlov // Physical Review Letters. – 2011. – Vol. 106, № 16. – P. 165506. – DOI 10.1103/PhysRevLett.106.165506.
4. Metlov, L. S. Nonequilibrium dynamics of a two-defect system under severe load / L. S. Metlov // Physical Review E. – 2014. – Vol. 90, № 2. – P. 022124. – DOI 10.1103/PhysRevE.90.022124.
5. Coleman, B. D. Thermodynamics with Internal State Variables / B. D. Coleman, M. E. Gurtin // Journal of Chemical Physics. – 1967. – Vol. 47, № 2. – P. 597–613. – DOI 10.1063/1.1711937.
6. Sarafanov, G. F. Screening of the elastic field in a dislocation ensemble / G. F. Sarafanov // Physics of the Solid State. – 1997. – Vol. 39, № 9. – P. 1403–1406. – DOI 10.1134/1.1130087.
7. Hirth, J. P. Theory of Dislocations / J. P. Hirth, J. Lothe. – 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 857 p. – ISBN 9780471091257.

УДК 535.42

ВЫЯВЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНУЮ АДРЕСНУЮ ЛОКАЛИЗАЦИЮ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ РАЗЛИЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ В КУБИЧЕСКОМ ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ ТИПА СИЛЛЕНИТА

Давыдовская В.В., канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0009-0002-1570-4134,
Федорова А.В., ORCID 0009-0006-9251-0244,
Тарасюк Е.В., ORCID 0009-0003-7617-3661,
Завалей С.Н., ORCID 0009-0005-9586-629X
УО «Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина», г. Мозырь, Республика Беларусь
valentina_dav@list.ru, linaf6399@gmail.com, zegi482@gmail.com, obucheniekurs7@gmail.com

Введение. Управление пространственной структурой световых пучков в нелинейных средах остаётся одной из центральных задач современной фотоники, поскольку открывает путь к созданию перестраиваемых элементов обработки оптических сигналов. В этом контексте фоторефрактивные кристаллы предоставляют уникальную возможность динамической локализации излучения за счёт внешних воздействий. В работе исследуются эффективные механизмы адресной локализации двумерных пучков, реализуемые путём вариации поляризации входного сигнала и приложения внешнего электрического поля.

В работе исследован механизм пространственной локализации двумерных оптических пучков в кристаллах силлиенитовой группы – $Bi_{12}SiO_{20}$ и $Bi_{12}TiO_{20}$. Ключевым фактором, обеспечивающим адресную фиксацию поперечного профиля волнового поля, выступает векторное (кросс-поляризационное) взаимодействие двух пучков внутри кубической решетки, инициирующее их взаимный захват.

Основная часть. В процессе численного моделирования будем использовать системе скалярных дифференциальных уравнений в частных производных, представленную в [1–3], а также следующие значениях параметров [4–5]:

– кристалла BSO: показатель преломления $n_0 = 2{,}54$; электрооптический коэффициент $r_{41} = 5\cdot10^{-12}$ м/В, удельное вращение кристалла $\rho = 22$ град/мм;

– кристалла BTO: $n_0 = 2{,}25$; $r_{41} = 6{,}175\cdot10^{-12}$ м/В, $\rho = 6{,}3$ град/мм;

– для обоих кристаллов: $\lambda = 0{,}6328$ мкм; длина кристалла 10 мм, входная плоскость кристалла $(\bar{1}\bar{1}0)$, ориентационный угол $\theta \approx 35{,}3°$, напряжённость внешнего электрического поля $E_0 = 3{,}5$ кВ/см ($\vec{E}_0 \parallel [1\,\bar{1}\,\bar{1}]$),

радиус пучка $r_0 = 16{,}53$ мкм; расстояние между центрами сечений пучков $\Delta = 18$ мкм.

В работе исследуется взаимодействие световых пучков в оптически активных кристаллах при следующей геометрии входа: верхний пучок (рисунок) поляризован вдоль оси *x*, т. е. его электрический вектор сонаправлен с вектором внешнего электростатического поля; нижний пучок, напротив, имеет ортогональную (*y*) поляризацию.

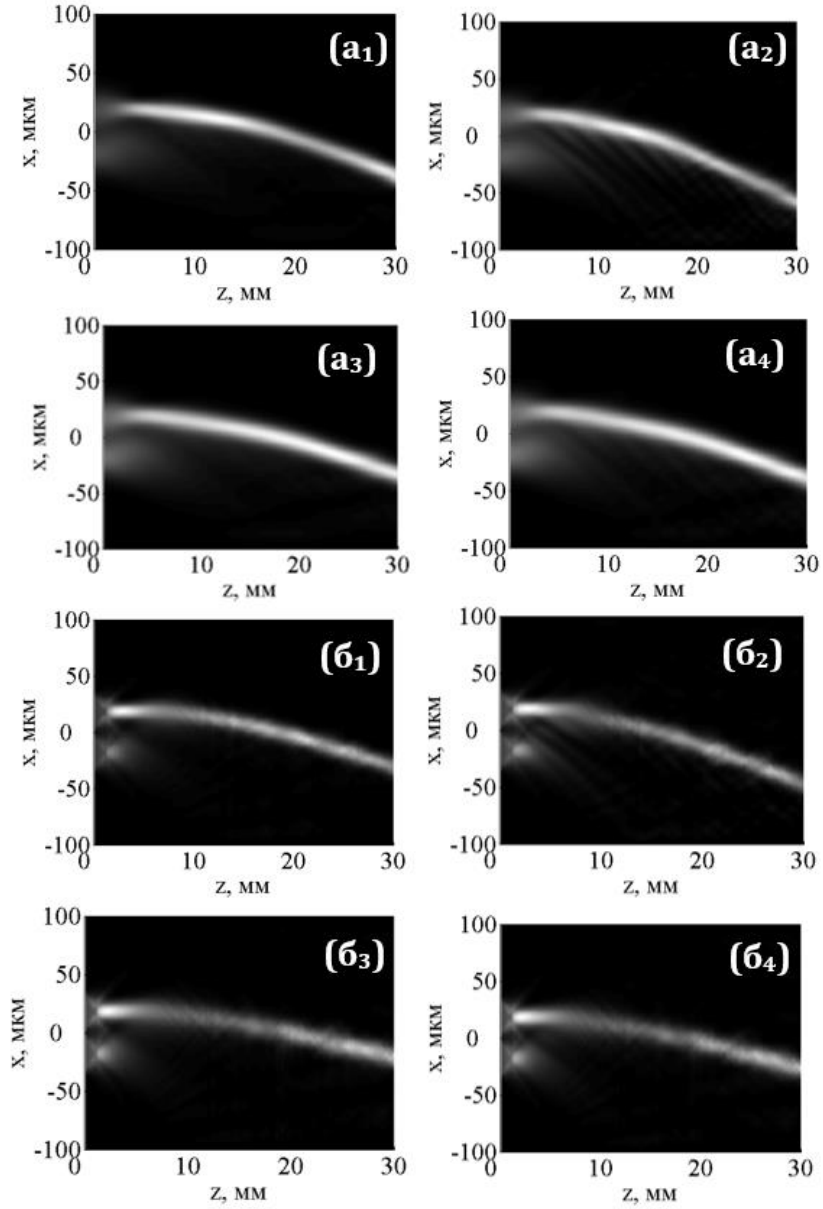


Рис. Взаимодействие двумерных ортогонально поляризованных световых пучков в кристаллах BSO и BTO: $а_1$ – $а_4$ – BSO; $б_1$ – $б_4$ – BTO
Распределение светового поля по толщине кристалла при взаимодействии гауссовых световых пучков: $а_1$, $б_1$ – без учета оптической активности; $а_2$, $б_2$ – с учетом оптической активности Распределение светового поля по толщине кристалла при взаимодействии супергауссовых световых пучков: $а_3$, $б_3$ – без учета оптической активности; $а_4$, $б_4$ – с учетом оптической активности

В кристаллах BSO и BTO кросс-поляризационное взаимодействие приводит к отклонению верхнего пучка в сторону нижнего, который, несмотря на сильное рассеяние, выполняет роль управляющего канала. При этом оптическая активность сред индуцирует отток энергии из верхнего пучка – данный эффект заметно выражен в BSO (рисунок 1, $а_2$, $б_2$), однако на величину поперечного смещения верхнего пучка он практически не сказывается, Представленные в статье результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее для одномерного случая [6].

Заключение. Таким образом, установлено, что оптическая активность кристаллов BSO и BTO не оказывает существенного влияния на степень пространственного смещения излучения, что подтверждает перспективность кубических фоторефрактивных материалов для реализации оптического управления световыми потоками без использования дополнительных электронных компонентов.

Список литературы

1. Шепелевич В. В. Влияние оптической активности на самофокусировку световых пучков в кубических фоторефрактивных кристаллах / В. В. Шепелевич [и др.] // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33, № 5. – С. 446–450.
2. Kukhtarev N. V. Holographic storage in electrooptic crystals / N. V. Kukhtarev [et al.] // Ferroelectrics. –1979. – Vol. 22, № 3–4. – P. 961–964.
3. Барковский, Л. М. Ковариантная форма диэлектрического тензора в кристаллах высшей и средней сингоний при векторном взаимодействии / Л. М. Барковский, Ф. И. Федоров // Кристаллография. – 1965. – Т. 10, № 2. – С. 174–180.
4. Królikowski, W. Interaction of two-dimentional spatial incoherent solitons in photorefractive medium / W. Królikowski [et al.] // Appl. Phys. B. – 1999. – Vol. 68. – P. 975–982.
5. Motzek, K. Dipole-mode vector solitons in anisotropic photorefractive media / K. Motzek [et al.] // Opt. Commun. – 2001. – Vol. 197. – P. 161–167.
6. Шепелевич, В. В. Влияние оптической активности на распространение двумерных пространственных солитонов в кубических фоторефрактивных кристаллах / В. В. Шепелевич [и др.] // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 4. – С. 353–357.

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Евдокимов В.Е., Сементеева Л.Ш., доц.
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
г. Уфа, РФ
evdokimovv720@gmail.com

Введение. Полупроводниковые материалы занимают центральное место в современной электронике, оптоэлектронике и микроэлектронике.

Понимание зависимости их электропроводности от температуры имеет важное значение как для фундаментальной физики, так и для многочисленных практических применений – от терморезисторов до солнечных батарей. В данной работе рассматриваются теоретические основы температурной зависимости удельного сопротивления собственных и примесных полупроводников на примере кремния и германия.

Электропроводность полупроводников. Электропроводность твёрдых тел в общем случае определяется выражением:

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu_n + p \cdot e \cdot \mu_p$$

где n и p – концентрации электронов и дырок соответственно, e – элементарный заряд, μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок. В полупроводниках вклад обоих типов носителей является существенным, в отличие от металлов, где основной вклад дают электроны.

Таким образом, электропроводность полупроводника зависит от двух ключевых факторов: концентрации носителей заряда и их подвижности. Обе эти величины существенно зависят от температуры, что и определяет сложный характер температурной зависимости проводимости.

Собственные полупроводники. В собственных (беспримесных) полупроводниках концентрация электронов равна концентрации дырок ($n = p = n_i$) и определяется распределением Ферми-Дирака. При не слишком высоких температурах, когда уровень Ферми расположен примерно посередине запрещённой зоны, справедливо выражение:

$$n_i = (N_c \cdot N_v)\text{^}(1/2) \cdot \exp(-E_g / 2kT)$$

где N_c и N_c – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне соответственно, E_g – ширина запрещённой зоны, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Соответственно, собственная проводимость имеет вид:

$$\sigma_i = n_i \cdot e \cdot (\mu_n + \mu_p) = C \cdot \exp(-E_g / 2kT)$$

где C – предэкспоненциальный множитель, слабо зависящий от температуры.

Примесные полупроводники. В примесных полупроводниках температурная зависимость электропроводности оказывается значительно более сложной и содержит три характерных участка.

При низких температурах проводимость определяется ионизацией примесных атомов (доноров или акцепторов). Этот участок называется областью примесной проводимости.

При повышении температуры все примесные атомы оказываются ионизованными – наступает область истощения примеси. В этом интервале температур концентрация носителей остаётся практически постоянной, равной концентрации примеси. Проводимость на данном участке определяется изменением подвижности носителей.

При достаточно высоких температурах становится существенной собственная проводимость – концентрация носителей снова начинает

расти экспоненциально, но уже с энергией активации $E_g/2$. Этот участок соответствует переходу к собственной проводимости.

Температурная зависимость подвижности. Подвижность носителей заряда также существенно зависит от температуры, причём для различных механизмов рассеяния эта зависимость различна. При рассеянии на ионизованных примесях подвижность растёт с температурой: μ ~ T^(3/2). Это связано с тем, что при повышении температуры носители движутся быстрее и проводят меньше времени вблизи примесного иона, что уменьшает эффективность рассеяния.

При рассеянии на акустических фононах (тепловых колебаниях кристаллической решётки) подвижность убывает с температурой: μ ~ T^(–3/2). В реальных полупроводниках при комнатных и более высоких температурах обычно доминирует именно фононное рассеяние. При высоких температурах, когда становятся существенными оптические фононы, падение подвижности с температурой становится ещё более быстрым.

Сравнение различных типов полупроводников. Кремний и германий, являясь типичными представителями полупроводников IV группы, демонстрируют схожие, но количественно различающиеся закономерности. Германий имеет меньшую ширину запрещённой зоны (0,66 эВ против 1,12 эВ у кремния), поэтому его собственная проводимость становится заметной при более низких температурах. Соответственно, германиевые приборы имеют более низкий верхний температурный предел работы.

Кроме того, для различных полупроводников характерны разные значения подвижности носителей и разные механизмы рассеяния при одинаковых температурах. Это определяется особенностями зонной структуры, эффективными массами носителей и другими параметрами.

Заключение. В результате теоретического рассмотрения можно сделать следующие выводы. Температурная зависимость электропроводности полупроводников определяется совместным действием двух факторов: изменением концентрации носителей заряда и изменением их подвижности. В собственном полупроводнике концентрация носителей растёт экспоненциально с температурой, что приводит к экспоненциальному росту проводимости. В примесном полупроводнике наблюдаются три характерных участка: примесная проводимость (низкие температуры), область истощения примеси (средние температуры) и собственная проводимость (высокие температуры).

Подвижность носителей в широком интервале температур убывает с ростом температуры по закону μ ~ T^(–3/2) из-за рассеяния на акустических фононах. При низких температурах может доминировать рассеяние на ионизованных примесях с зависимостью μ ~ T^(3/2). Полученные теоретические результаты имеют важное практическое значение для проектирования полупроводниковых приборов и создания температурных датчиков

Список литературы

1. Епифанов Г. И. Физика твёрдого тела: учебное пособие / Г. И. Епифанов. – М.: Высшая школа, 2019. – 360 с.
2. Павлов П. В. Физика твёрдого тела: учебник для вузов / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – М.: Физматлит, 2020. – 496 с.
3. Бонч-Бруевич В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М.: Наука, 2017. – 680 с.
4. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела / Ч. Киттель. – М.: Техносфера, 2018. – 800 с.
5. Шалимова К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. – М.: Лань, 2019. – 320 с.
6. Андреев В. А. Методы исследования полупроводниковых материалов / В. А. Андреев // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 45. – № 3. – С. 120–128.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 2018. – 816 с.

УДК 538.915

РАСЧЕТ ПАРЦИАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ ГРАФЕНА, ДОПИРОВАННОГО АЗОТОМ

***Камара Д.*[1],**
***Маркидонов А.В.*[1,2],** д-р физ.-мат. наук, доц., ORCID 0000-0002-4566-528X
[1]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, РФ
[2]КГПИ ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Новокузнецк, РФ
_cadj87269@gmail.com, markidonov_artem@mail.ru

Графен обладает уникальными электронными свойствами: рекордной подвижностью носителей заряда, высокой проводимостью и прозрачностью. Однако отсутствие собственной запрещённой зоны ограничивает его применение в полупроводниковой электронике, особенно в цифровых устройствах, требующих управляемого переключения.

Методы модификации свойств графена направлены прежде всего на открытие и управление запрещённой зоной, а также на контроль типа проводимости (*p*- или *n*-тип). Можно выделить следующие основные категории данных методов: геометрическая модификация (уменьшение размера графенового листа в одном направлении до величин, меньших боровского радиуса), ковалентная и нековалентная модификация, интеркаляция, электростатическое управление, поверхностный перенос заряда и гетероатомное замещение [1, 2].

Последний метод предполагает замену атомов углерода в кристаллической решётке графена на чужеродные атомы. Наиболее распространённые допанты – азот и бор, обладающие близкими к углероду атомными радиусами. Также исследуется допирование фосфором, серой и кремнием.

Для всестороннего исследования допированного графена применяют комплекс методов, дополняющих друг друга. Из экспериментальных методов следует выделить электротранспортные измерения, а также различные виды спектроскопий: Рамановская, XPS, ARPES, TEM и SEM [3]. Среди теоретических методов важнейшую роль в предсказании и интерпретации свойств допированного графена играют расчёты из первых принципов в рамках теории функционала плотности (DFT). Они позволяют, например, рассчитать зонную структуру и определить величину открываемой запрещённой зоны для различных типов и концентраций допантов, определить наиболее энергетически выгодные положения атомов допантов в решётке графена, а также оценить стабильность различных конфигураций допирования.

В рамках проводимого нами исследования методом DFT с помощью PAW-псевдпотенциалов изучались электронные свойства графена, допированного атомами азота. Азот имеет на один валентный электрон больше, чем углерод, и при замещении в графитовой конфигурации каждый атом азота вносит примерно 0,5 электрона в π-систему графена, обеспечивая *n*-проводимость.

Известно, что существуют три основные конфигурации азота в графене: замещающий, пиридиновый и пиррольный азот. В нашем случае допирование графена, модель которого представляла собой гексагональную суперячейку 4×4, содержащую 32 атома, осуществлялось заменой от одного до шести атомов углерода атомами азота, в результате чего достигалась концентрация примесей от 3.125% до 18.75% [4].

При исследовании электронных свойств твёрдого тела одной из основных характеристик является плотность электронных состояний (DOS), количественно отражающая число разрешённых энергетических уровней, доступных для заселения электронами, в единичном интервале энергий. Частным случаем данной характеристики является парциальная плотность состояний (PDOS), позволяющая дифференцировать вклад отдельных атомных орбиталей в суммарную плотность состояний.

Анализ рассчитанных зависимостей полной и парциальной плотностей состояний для идеального графена позволяет заключить, что формирование его энергетической структуры обусловлено преимущественно *p*-орбиталями атомов углерода, ответственными за образование делокализованных π-связей.

Рисунок демонстрирует аналогичные спектральные зависимости для допированного графена при концентрации атомов азота, составляющей 6,25 %. Согласно представленным результатам, доминирующий вклад в общую плотность состояний по-прежнему вносят *p*-орбитали атомов углерода и азота. Существенным отличием является наблюдаемый сдвиг уровня Ферми в область энергий выше точки Дирака, что свидетельствует о модификации электронной структуры графена в результате внедрения азотных допантов.

Результаты расчётов ширины запрещённых зон указывают на формирование энергетической щели в спектре допированного графена. При этом выявлена немонотонная зависимость величины запрещённой зоны от параметров допирования, что открывает возможности для прецизионной настройки ширины щели. В рассматриваемом случае графен проявляет свойства полупроводника *n*-типа.

Немонотонный характер указанной зависимости коррелирует с особенностями пространственного распределения допантов в кристаллической решётке графена, в частности, с их неупорядоченным расположением. Данный вывод согласуется с результатами, полученными в работе [5].

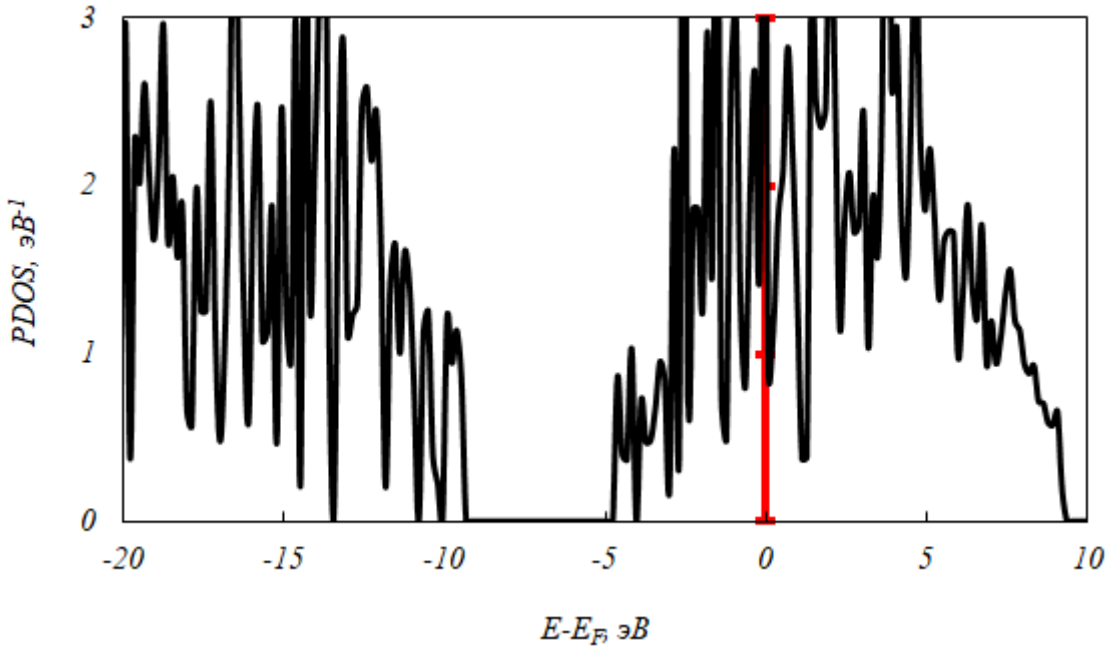


Рис. PDOS для графена, допированного азотом (концентрация 6.25 %)

Таким образом, допирование представляет собой ключевой инструмент преодоления ограничения в использовании графена как наиболее перспективного материала для электроники XXI века. На сегодняшний день основные нерешённые задачи включают разработку методов масштабируемого и контролируемого допирования с заданной пространственной локализацией, обеспечение долгосрочной стабильности допированных структур на воздухе и при повышенных температурах, а также интеграцию допированного графена в существующую КМОП-технологию. Решение этих задач позволит графену перейти от лабораторных демонстраций к промышленным электронным устройствам.

Список литературы

1. Guo B. Graphene Doping: A Review / B. Guo, L. Fang, B. Zhang [et al.] // Insciences Journal. – 2011. – V. 1. – №2. – P. 80-89. – DOI:10.5640/insc.010280.

2. Ma L.-P. Progress in Surface Charge Transfer Doping of Graphene / L.-P. Ma, W. Ren, H.-M. Cheng // Acta Physico-Chimica Sinica. – 2022. – V. 38. – №1. – P. 2012080. – DOI: 10.3866/PKU.WHXB202012080.
3. Susi T. Other Spectroscopic Methods for Graphene Characterization: X-Ray and Electron Spectroscopies / T. Susi // Graphene. – 2021. – Pp. 413-436. – DOI: 10.1016/b978-0-08-102848-3.00011-6.
4. Камара Д. Модификация электронных свойств графена, допированного атомами азота / Д. Камара, М. Диавара, М. Сейду и др. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2026. – Т. 55. – №1. – С. 17-26. – DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-17-26.
5. Kresse G. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented wave method / G. Kresse, J. Joubert // Physical Review B. – 1999. – V. 59. – №3. – Pp.1758-1775. – DOI: 10.1103/PhysRevB.59.1758.

УДК 538.911

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ШИРОКОПОЛОСНЫХ ФОТОДИОДОВ ТРЕХМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

***Кижаев С.С.*[1],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0009-0002-7762-0753,
***Стоянов Н.Д.*[1],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0009-0004-1372-3336,
***Черняев А.В.*[2],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0009-0008-4231-2834
[1]ООО «ЛЕД Микросенсор НТ» (Санкт-Петербург), г. Санкт-Петербург, РФ
[2]ФГКВОУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» МО РФ, г. Санкт-Петербург, РФ
chernyaevav@yandex.ru

Введение. Для применения в сфере экологии в настоящее время требуются качественные оптические сенсоры с низким потреблением энергии, работающие в инфракрасной (ИК) области спектра. В лабораториях России и за рубежом [1, 2] разрабатываются основные компоненты сенсоров: светодиоды и фотодиоды, которые должны быть надежны и обладать требуемыми рабочими характеристиками.

Цель работы. Как правило, спектральная чувствительность наших фотодиодов имеет достаточно высокие значения: (1.1 – 1.4) А/Вт на длине волны 3300 нм. В настоящей работе кратко описаны результаты серии технологических экспериментов, проведенных в ООО «ЛЕД Микросенсор НТ» (Санкт-Петербург) с целью улучшения электрических параметров фотодиодов спектрального диапазона (1600 – 3500) нм, перекрывающего одну из полос поглощения метана [3].

Основная часть. Традиционно рост фотодиодных структур проводится методами газофазной эпитаксии на подложке n-InAs: активный слой n-InAs (толщиной 2,5 – 3,5 мкм) и барьерный (широкозонный) слой

InAsSbP:Zn (толщиной 1 – 1,5 мкм). Легирование акцепторной примесью Zn осуществляется непосредственно во время роста барьерного слоя.

Со стороны длинных волн спектр чувствительности ограничен красной границей фотоэффекта, соответствующей активной области (ширина запрещенной зоны E_g = 0,35 эВ). Излучение воздействует на гетероструктуру со стороны широкозонного слоя, играющего роль «оптического окна».

В работе использовалось лабораторное оборудование (спектральная установка) на основе монохроматора МДР-41 (производство ООО «ОКБ Спектр», Санкт-Петербург) [4]. Измерения электрических и оптических свойств проводились в ООО «ЛЕД Микросенсор НТ», Санкт-Петербург [5]. Проблемы, связанные с использованием подложек различных производителей, описаны в работе [6].

Серия 1. Легирование активной области. Известно, что положение p-n перехода в гетероструктуре напрямую влияет на ее рабочие характеристики. В наших экспериментах установлено, что слабое легирование части активной области InAs атомами кремния позволяет улучшить качество структуры и добиться увеличения количества годных чипов. Данный факт связан, по-видимому, со сдвигом положения p-n перехода в сторону от подложки к барьерному слою. При этом приблизительно определена граница уровня легирования, выше которой результаты ухудшаются.

Серия 2. Варьирование состава широкозонного слоя. Количественный состав барьерного слоя InAsSbP, как известно, влияет на условия электронного ограничения и, соответственно, величину внутреннего квантового выхода. В данной работе показано, что увеличение содержания InP в пределах (20 – 50) мол.% в твердом растворе (соответствующий диапазон E_g = 0,45 – 0,60 эВ) приводит к увеличению электрического сопротивления фотодиодной структуры и, соответственно, величины обнаружительной способности.

Заключение. Таким образом, благодаря проведенным технологическим экспериментам в настоящее время достигнуты следующие рабочие параметры для фотодиодов с размером чувствительной площадки 0,5 мм: чувствительность: 1,4 А/Вт (при 3300 нм); электрическое сопротивление: 1,0 кОм (при обратном смещении 10 мВ); обнаружительная способность: $1{,}5*10^{10}$ см*$Гц^{1/2}$/Вт (при 3300 нм).

Список литературы

1. Карандашев С. А. Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия (обзор: десять лет спустя) / С. А. Карандашев, Б. А. Матвеев, М. А. Ременный // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т 53, вып. 2. – С. 147-157.
2. Gomółka G., Kłos K., Pawluczyk J., Kowalczyk M., Martyniuk P., Sterczewski Ł.A., Appl. Phys. Letters GHz-bandwidth InAs/InAsSbP barrier infrared detectors for the 3.0–

3.7 μm spectral region operating at room temperature. – 2026. – Vol. 129, Issue 12 https://arxiv.org/abs/2605.26276.
3. https://hitran.com [Электронный ресурс].
4. https://okb-spectr.ru [Электронный ресурс].
5. https://ru.lmsnt.com [Электронный ресурс].
6. Черняев А. В. Узкополосные фотодиоды трехмикронного диапазона с управляемой шириной спектра для детектирования метана / А. В. Черняев, Н. Д. Стоянов, С. С. Кижаев, В. А. Мартынов // Материалы IX Международной научной конференции «Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности». – Т. 2: физические, химические, технические и компьютерные науки. – Ч. 2. – С. 107-108.

УДК 538.9

ПРОЗРАЧНОСТЬ ТУННЕЛЬНОГО БАРЬЕРА В ОДНОЗОННОЙ МОДЕЛИ ДИЭЛЕКТРИКА

***Коркишко В.В.*[1],** ORCID 0009-0000-3147-0812,
***Хачатурова Т.А.*[2],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0009-0002-3993-0785,
***Гусев А.А.*[2],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0002-3384-8572,
***Бутько В.Г.*[2],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0009-0007-9908-8506
[1]ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
[2]ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
vv.korkishko@mail.ru, khachaturovat@mail.ru

Введение. Исследования туннельных явлений остаются одной из центральных тем современной конденсированной физики и нанотехнологий. Развитие туннельной спектроскопии и ключевые открытия и изобретения, такие как туннельный диод, эффект Джозефсона, заложили основу квантовой электроники и сенсорики.

Теоретическая часть. Величина и форма вольтамперных характеристик туннельного барьера зависят от целого комплекса параметров, каждый из которых вносит свой вклад в общую картину проводимости [1,2]. Прежде всего, критическим фактором является толщина барьера. Даже минимальные изменения толщины на уровне ангстремов приводят к экспоненциальному изменению прозрачности и, следовательно, тока. Это делает технологический контроль процесса осаждения и формирования изолирующего слоя ключевым условием воспроизводимости характеристик.

Не менее важна высота барьера, определяемая разностью уровней Ферми металлов и энергетическим профилем изолятора [3]. Повышение высоты барьера увеличивает мнимый волновой вектор в запрещённой области и резко снижает вероятность туннелирования.

Проведём расчёт прозрачности барьера для контакта электроды, которого выполнены из алюминия. Для расчёта прозрачности используем приближение Венцеля-Крамерса-Бриллюэна, так называемое ВКБ-приближение [4]:

$$P_{\mathrm{WKB}}(E) = \exp\left(-2\int_{z_a}^{z_b} \left| k_z(E,z) \right| dz \right), \quad (1)$$

где k_z – компонента волнового вектора электрона вдоль направления туннелирования, $z_b - z_a = d$ – толщина барьера, E – энергия электрона.

Как было показано раннее расчёт можно провести по формуле, которая связывает прозрачность барьера с такими параметрами, как высота и толщина барьера, в зависимости от поданного на контакт напряжения следующим образом [4]:

$$P(V) = \exp\left(-\frac{A_d}{\varphi_2 - e\cdot V - \varphi_1} \left((\varphi_2 - e\cdot V - E_z)^{3/2} - (\varphi_1 - E_z)^{3/2} \right) \right), \quad (2)$$

здесь φ_1 и φ_2 – высоты потенциального барьера, A_d – величина, определяемая толщиной d: $A_d = \frac{4\sqrt{2m}\cdot d}{3\hbar}$, а $E_z = \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m}$, где m – масса электрона, V – разность потенциала на переходе, E_z – энергия, соответствующая волновому вектору электрона вдоль направления туннелирования.

Равенство энергий Ферми алюминиевых электродов позволяет считать форму потенциального барьера прямоугольной [5]. А значит, расстояния от уровня Ферми и правого и левого металла до верхнего края барьера, так называемые высоты потенциального барьера, φ_1 и φ_2 совпадают. Входящие в формулу для $P(V)$ параметры: толщина барьера d и высота барьера φ принимают различные значения, в зависимости от толщины окисла и положения уровня Ферми перехода.

Проведём расчёт прозрачности туннельного барьера для фиксированной толщины барьера 2 нм. При этом высота потенциального барьера принимает разные значения от 1.5 эВ до 4.0 эВ (рис. 1). Теперь рассчитаем $P(V)$ при разных толщинах равных 1.57 нм и 2.0 нм и фиксированной толщине барьера в 1.5 эВ как показано на рисунке 2.

Заключение. Исследование функции $P(E_z, V)$ при разных значениях параметров φ и d показало, что в однозонном приближении $P(V)$ является монотонно возрастающей функцией, количественные значения которой значительно, на порядки величин, зависят от малых изменений параметров барьера, как толщины, так и высоты барьера, и существенно уменьшаются с возрастанием этих параметров.

Практическая значимость. Результаты имеют важное практическое значение для проектирования туннельных гетероструктур, туннельных диодов и элементов спинтроники [6].

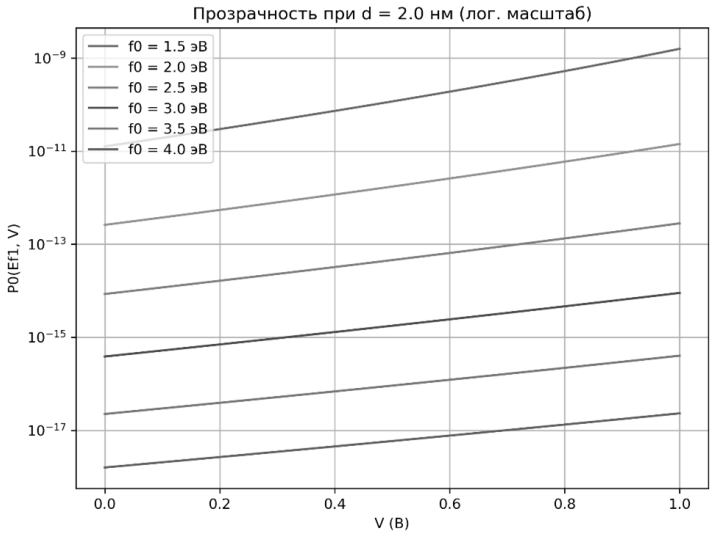


Рис. 1. Прозрачность барьера при разных значениях высоты барьера

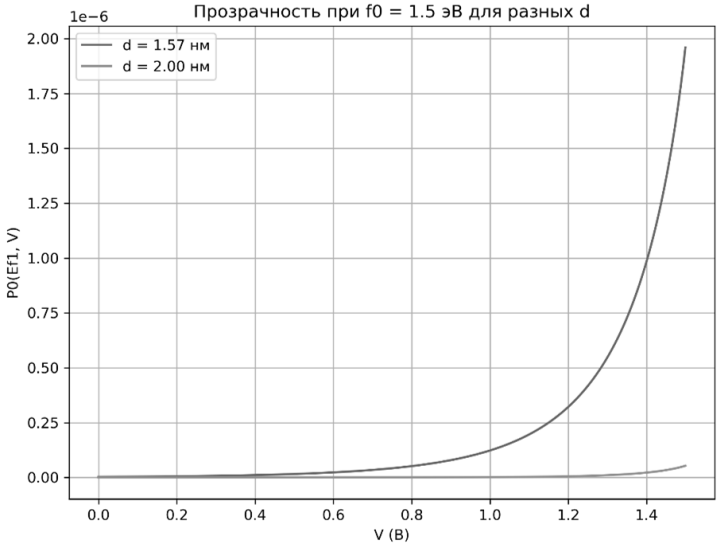


Рис. 2. Прозрачность барьера при разных толщинах барьера

Список литературы

1. Esaki L. New phenomenon in narrow germanium p–n junctions / L. Esaki // Physical Review. – 1958. – Vol. 109, No. 2. – P. 603–604. – DOI: 10.1103/PhysRev.109.603.
2. Harrison W. A. Applied Quantum Mechanics / W. A. Harrison. – Singapore: World Scientific, 2000. – 432 p. – ISBN 978-981-02-4180-6.
3. Давыдов А.С. Квантовая механика / А. С. Давыдов. – М.: Наука, 1973. – 703 с.
4. Floyd R.B. A model of nonlocal electrostatics / R. B. Floyd, D. G. Wamsley // Journal of Physics C: Solid State Physics. – 1978. – Vol. 11. – P. 4601–4610. – DOI: 10.1088/0022-3719/11/23/018.
5. Хачатурова Т.А. Прозрачность туннельного барьера в однозонной модели перехода с металлическими электродами / Т. А. Хачатурова, В. Г. Бутько, А. А. Гусев и др. // Физика и техника высоких давлений. – 2026. – Т. 36, № 1. – С. 94–101.
6. The Royal Swedish Academy of Sciences. Press release: The Nobel Prize in Physics 2025: Their experiments on a chip revealed quantum physics in action [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kva.se/en/news/the-nobel-prize-in-physics-2025/ (дата обращения: 08.10.2026). – Published: 2025‑10‑07.

УДК 880.3:539.386

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ

Мирошниченко С.В.[1], ORCID 0000-0003-1362-6283,
Гангало А.Н.[1,2], канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-5683-1346
[1]ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
[2]ФГБНУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк, РФ
svmiro@mail.ru

Введение. При математическом моделировании обработки металлов давлением корректность задания граничных условий контактного взаимодействия является определяющим фактором достоверности получаемых результатов. В практике конечно-элементного анализа равноканального углового прессования (РКУП) сложилась ситуация, когда множество численных моделей используют закон трения Амонтона-Кулона [1], тогда как аналитические решения, описывающие границы перехода между режимами течения (в частности, начало формирования веерной зоны), традиционно базируются на законе Зибеля [2]. Это затрудняет прямое сопоставление результатов, полученных в рамках разных моделей трения, без установления количественной связи между их коэффициентами.

Особую остроту эта проблема приобретает при анализе условий, обеспечивающих реализацию кинематики, близкой к идеальной схеме простого сдвига. Данный режим, соответствующий полному заполнению внешнего угла канала и отсутствию застойных зон, является оптимальным с точки зрения однородности накопленной деформации и формирования ультрамелкозернистой структуры [2,3]. Однако граница, разделяющая режимы незаполнения канала и формирования застойной зоны, в рамках каждой из моделей трения определяется своим критическим коэффициентом (μ_{cr} и m_{cr} соответственно), и вопрос об их взаимном соответствии остается открытым.

Цель работы – разработка методики оценки критических коэффициентов трения Амонтона-Кулона и Зибеля, соответствующих условию полного заполнения канала при РКУП, и установление вида аналитической зависимости между ними и угловым параметром оснастки.

Основная часть. Для получения количественных оценок, пригодных для практического использования, в работе применены два подхода: аналитический метод линий скольжения [2] и численное моделирование МКЭ в программном комплексе DEFORM-2D [4]. Каждый метод имеет ограничения. Аналитический метод учитывает угловой зазор и веерную зону лишь в рамках строгих допущений о геометрии очага деформации, что ограничивает его использование. Численное моделирование эти

эффекты учитывает, но нуждается в верификации. Совместное применение обоих подходов обеспечивает более надёжные оценки.

Моделирование проводили в плоской постановке для идеально-пластического материала с напряжением течения $\sigma s = 100$ МПа. Исследовали диапазон углов пересечения каналов $\Phi \in [\pi/2; 2\pi/3]$, что соответствует наиболее эффективным конфигурациям оснастки для структурообразования. Значения коэффициента трения Амонтона-Кулона меняли в интервале 0…0,3 с шагом 0,05. Для корректного сопоставления с аналитическими решениями геометрию рабочей полости задавали без радиусов сопряжения.

В качестве критерия, разграничивающего режимы течения, было принято условие: $\mu=\mu_{cr}$, при котором реализуется режим с полностью заполненным каналом, предшествующий началу расширения веерной зоны, что обеспечивает наилучшую сходимость численных и аналитических оценок. Любое отклонение коэффициента трения от критического значения нарушает эту картину: возникает либо угловой зазор, либо застойная (веерная) зона [1]. Оба эффекта искажают кинематику течения, что приводит к неоднородности деформации [5].

Анализ картин течения, полученных МКЭ, позволил для каждого фиксированного угла Ф определить экспериментальное значение критического коэффициента трения Амонтона-Кулона μ_{cr}. Параллельно, с использованием аналитического решения, основанного на законе Зибеля, были рассчитаны соответствующие критические значения коэффициента m_{cr} для тех же угловых параметров. Полученные значения критических коэффициентов трения для углов $\Phi = (\pi/2, 5\pi/9, 11\pi/18, 2\pi/3)$ приведены на рис. 1.

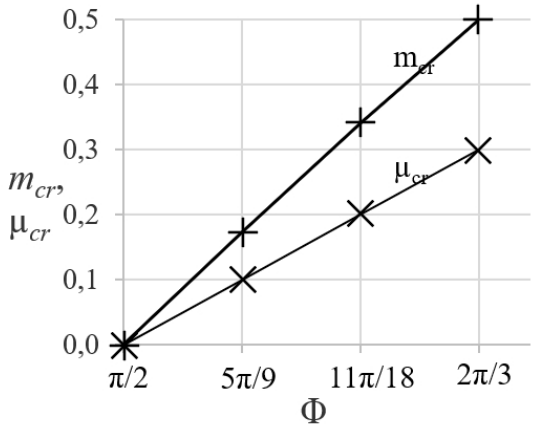


Рис. 1. Зависимость критических коэффициентов трения Амонтона-Кулона и Зибеля от угла пересечения каналов

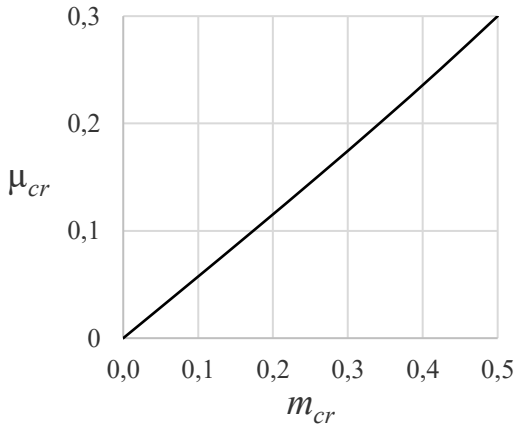


Рис. 2. Соотношение критических значений коэффициентов трения моделей Зибеля и Амонтона-Кулона

Анализ данных МКЭ показал, что зависимость $\mu_{cr}=f(\Phi)$ исследованном диапазоне с высокой точностью описывается линейной функцией:

$$\mu_{cr} = 0.573\left(\Phi - \pi/2\right). \quad (1)$$

Полученная зависимость позволяет вычислять кулоновскую составляющую контактного трения непосредственно по заданному углу пересечения каналов без дополнительного численного моделирования.

Поскольку критический коэффициент трения по Зибелю связан с углом классическим соотношением [2]: $m = -\cos(\Phi)$, подстановка $\Phi = \arccos(-m_{cr})$ в (1) после преобразования: $\arccos(-m_{cr}) = \pi/2 + \arcsin(m_{cr})$, даёт явную связь между коэффициентами двух моделей трения:

$$\mu_{cr} = 0.573\left(\arcsin(m)\right). \quad (2)$$

Выражение (2) с высокой точностью описывает переход от модели Зибеля к модели Амонтона-Кулона в диапазоне $m_{cr} \in [0;0.5]$.

Графическое сопоставление коэффициентов трения Амонтона-Кулона и Зибеля для исследованных углов приведено на рис. 2.

Заключение. Для равноканального углового прессования в рамках МКЭ определены критические значения коэффициента трения Амонтона–Кулона, отвечающие условию заполнения канала до зарождения веерной зоны. Установлена зависимость критического коэффициента трения Амонтона-Кулона от углового параметра Φ для диапазона $\Phi \in [\pi/2;\ 2\pi/3]$. Получены выражения, связывающие критический коэффициент трения Амонтона-Кулона с критическим коэффициентом модели Зибеля. Предложенные модели просты в расчётах и дают расхождение в пределах 0,01 %, что делает их эффективными для получения достоверных количественных данных.

Список литературы

1. Гангало, А. Н. Исследование влияния геометрии рабочего канала на гидростатическое давление в процессе равноканального углового прессования / А. Н. Гангало, С. В. Мирошниченко // Вопросы материаловедения. – 2025. – №. 2 (122). – С. 50-61. https://doi.org/10.22349/1994-6716-2025-122-2-50-61.
2. Segal V. M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion / V. M. Segal // Materials Science and Engineering A. – 2003. – V. 345. – P. 36-46. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00258-7.
3. Segal V. M. Equal-Channel Angular Extrusion (ECAE): From a Laboratory Curiosity to an Industrial Technology / V. M. Segal // Metals. – 2020. – Vol. 10 (2). – P. 1-15. DOI:10.3390/met10020244.
4. Гангало А. Н. Оценка гидростатического давления при равноканальном угловом прессовании с учетом геометрии канала и модели трения / А. Н. Гангало, С. В. Мирошниченко // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2026. – №4 (176). – С. 127-135. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-78-88.
5. Valiev R. Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / R. Z. Valiev, T. G. Langdon // Progress in Materials Science. – 2006. – Vol. 51. – P. 881. DOI:10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.

УДК 536.424:004.85

ОБНАРУЖЕНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ИЗИНГА МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ: ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА РЕШЁТКИ

***Мухаметрахимов И.И.*[1],** ORCID 0009-0002-6601-3763,
***Мухаметрахимова А.И.*[2],** канд. физ.-мат. наук,
ORCID 0009-0005-3724-429X
[1]ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы», г. Уфа, РФ
[2]ГБПОУ «Уфимский колледж радиоэлектроники, телекоммуникаций и безопасности», г. Уфа, РФ
m_ilnur_i@mail.ru albina8558@yandex.ru

Введение. Фазовые переходы относятся к ключевым объектам статистической физики, а выявление фаз по данным моделирования всё чаще поручают методам машинного обучения [2, 3, 5]. Двумерная модель Изинга имеет точное решение Онзагера [1], поэтому служит стандартным полигоном для проверки таких методов: критическая температура бесконечной решётки равна

$$T_c = \frac{2}{ln(1+\sqrt{2})} \approx 2{,}2692 \qquad (1)$$

В единицах J/k_B. Ранее было установлено, что метод главных компонент (PCA) без учёта температурных меток позволяет выделить параметр порядка [2]. Настоящее исследование фокусируется на количественном аспекте: как оценка T_c, полученная на основе первой главной компоненты, зависит от размера решётки и как она соотносится с классическими оценками, основанными на восприимчивости и кумулянтах Биндера [4]. Задача работы заключается в воспроизводимой оценке T_c методом PCA для решёток размером *L=16–48* и сравнении полученного результата с точным значением.

Основная часть. Рассматривалась модель Изинга с гамильтонианом

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} s_i\, s_j, s_i = \pm 1,$$

где суммирование ведётся по ближайшим соседям, на квадратных решётках $L \times L$ $(L = 16{,}24{,}32{,}48)$ с периодическими граничными условиями. Конфигурации генерировались алгоритмом Метрополиса [6] с шахматным обновлением. Для каждого L рассматривалось 29 значений температуры от 1,0 до 3,5 (шаг 0,03 в интервале 2,0–2,6 и 0,25 вне его). При каждой температуре выполнялось 2000 свипов термализации, после чего записывалось 400 конфигураций с интервалом 30 свипов. Поскольку энергия не меняется при перевороте всех спинов, каждой конфигурации случайно приписывался знак ± 1, что восстанавливает в выборке

симметрию $m \to -m$. Для каждого L все 11 600 конфигураций объединялись в один набор без меток температуры, к которому применялся PCA (scikit-learn [7]). Для сравнения вычислялись намагниченность на спин m, восприимчивость и кумулянт Биндера:

$$\chi = \frac{L^2}{T}(\langle m^2 \rangle - \langle | m | \rangle^2) \quad (2)$$

$$U = 1 - \frac{\langle m^4 \rangle}{3\langle m^2 \rangle^2} \quad (3)$$

Псевдокритическую температуру $T^*(L)$ определяли по максимуму χ и по максимуму дисперсии $|PC1|$ (параболическая подгонка в окрестности максимума), а значение при $L \to \infty$ – подгонкой

$$T^*(L) = T_c + \frac{a}{L},$$

с фиксированным показателем $\nu = 1$.

На рис. 1а показаны проекции конфигураций (L = 32) на две первые главные компоненты: при низких температурах они образуют два кластера, отвечающих двум упорядоченным состояниям, при высоких – один кластер вблизи нуля. Проекция на PC1 линейно связана с намагниченностью (коэффициент корреляции 0,9999999, рис. 1б), т.е. PCA без каких-либо меток находит параметр порядка. Доля дисперсии, приходящаяся на PC1, убывает с ростом решётки от 0,49 (L = 16) до 0,40 (L = 48) (таблица), вклад остальных компонент не превышает 0,02.

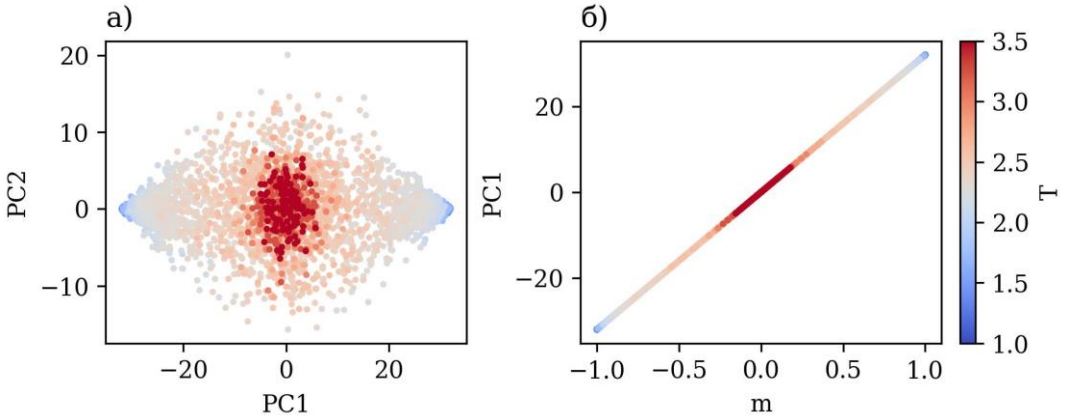


Рис. 1. Конфигурации при L = 32 (цвет – температура): а) в плоскости PC1–PC2; б) PC1 и намагниченность m

Дисперсия |PC1| имеет выраженный максимум вблизи T_c, растущий с размером системы (рис. 2а); с точностью до множителя T она совпадает с восприимчивостью (2). Положения максимумов T*(L) приближаются к точному значению с ростом L (табл.). Подгонка при $\nu = 1$ даёт $T_c = 2{,}262$ по χ и 2,247 по PC1, что на 0,3 % и 1,0 % ниже точного значения 2,2692. Кривые кумулянта Биндера для разных L пересекаются в окрестности T ≈ 2,2–2,3 (рис. 2б), однако пересечения отдельных пар решёток (2,254; 2,171; 2,294 для пар 16–24, 24–32, 32–48) заметно разбросаны, что отражает статистический шум при 400 коррелированных конфигурациях на точку.

Таблица

Положения максимумов и доля дисперсии PC1

L	T*(L) по χ	T*(L) по Var|PC1|	Доля PC1
16	2,423	2,445	0,491
24	2,358	2,366	0,447
32	2,324	2,323	0,421
48	2,327	2,328	0,401
∞ (подгонка)	2,262	2,247	—

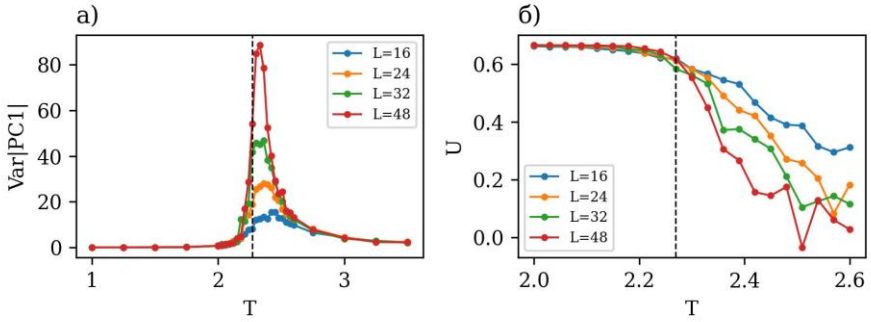


Рис. 2. а) дисперсия |PC1|; б) кумулянт Биндера.
Штриховая линия – точное значение T_c

Заключение. Показано, что PCA без меток температуры воспроизводит намагниченность как параметр порядка двумерной модели Изинга, а оценки T_c по PC1 и по восприимчивости при экстраполяции $L \to \infty$ согласуются с точным значением в пределах около 1 %. Ограничения: четыре размера решётки, шаг по температуре 0,03, отсутствие оценки статистических погрешностей и фиксированный показатель $\nu = 1$, поэтому согласие не следует трактовать как улучшение классических оценок.

Список литературы

1. Onsager L. Crystal statistics. I. A two-dimensional model with an order-disorder transition / L. Onsager // Physical Review. – 1944. – Vol. 65, № 3–4. – P. 117–149. – DOI 10.1103/PhysRev.65.117.
2. Wang L. Discovering phase transitions with unsupervised learning / L. Wang // Physical Review B. – 2016. – Vol. 94, № 19. – Art. 195105. – DOI 10.1103/PhysRevB.94.195105.
3. Carrasquilla J. Machine learning phases of matter / J. Carrasquilla, R. G. Melko // Nature Physics. – 2017. – Vol. 13, № 5. – P. 431–434. – DOI 10.1038/nphys4035.
4. Binder K. Finite size scaling analysis of Ising model block distribution functions / K. Binder // Zeitschrift für Physik B. – 1981. – Vol. 43, № 2. – P. 119–140. – DOI 10.1007/BF01293604.
5. Wetzel S. J. Unsupervised learning of phase transitions: from principal component analysis to variational autoencoders / S. J. Wetzel // Physical Review E. – 2017. – Vol. 96, № 2. – Art. 022140. – DOI 10.1103/PhysRevE.96.022140.
6. Metropolis N. Equation of state calculations by fast computing machines / N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth [et al.] // The Journal of Chemical Physics. – 1953. – Vol. 21, № 6. – P. 1087–1092. – DOI 10.1063/1.1699114.
7. Pedregosa F. Scikit-learn: machine learning in Python / F. Pedregosa et al. // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – P. 2825–2830.

УДК 535.37:539.216

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛЁНОК CN_x:Eu_yO_z

Посыпаев А.А., ORCID 0009-0000-8259-5498***, Недёркин В.В.,***
Шемченко Е.И., канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0001-9773-9394
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
arseniyyy63@yandex.ru

Введение. Углеродные материалы, легированные европием, широко применяется в ядерной энергетике, как поглотители нейтронов, а также служат источником лазерного излучения в видимой области спектра с длиной волны (610÷630) нм. Поэтому оксид европия широко используется для создания жидкостных и твердотельных лазеров видимого диапазона.

Добавление оксида европия в углеродные наноструктуры изменяет локальное окружение люминофоров, в результате изменяются их люминесцентные свойства, резко повышая интенсивность излучения и улучшая механизмы передачи энергии возбуждения [1,2].

Целью работы является исследование структурных особенностей плёнок CN_x:Eu_yO_z, на основе анализа спектров люминесценции.

Основная часть. Плёнки нитрида углерода, легированные оксидом европия в процессе роста – CN_x:Eu_yO_z, были получены с помощью DC-магнетрона вакуумной модернизированной установки ВУП-5М, сораспылением комбинированной углерод-металлооксидной мишени в атмосфере азота. Применяли планарный DC-магнетрон с индукционной стабилизацией плазмы. В качестве мишени использовали графит, на котором располагали примесь в виде порошка Eu_2O_3.

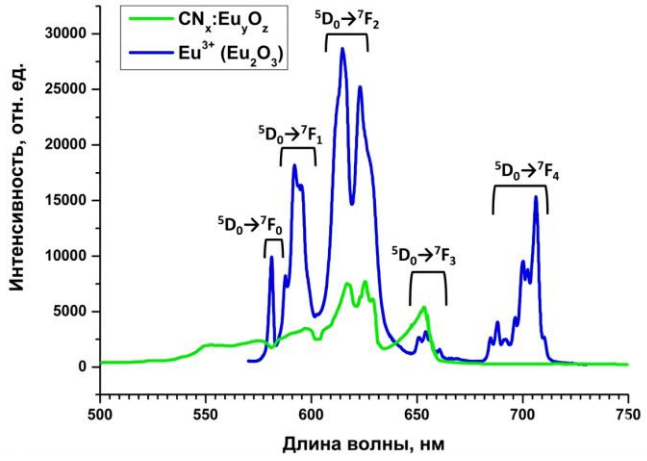
Таблица

Параметры получения углеродных плёнок

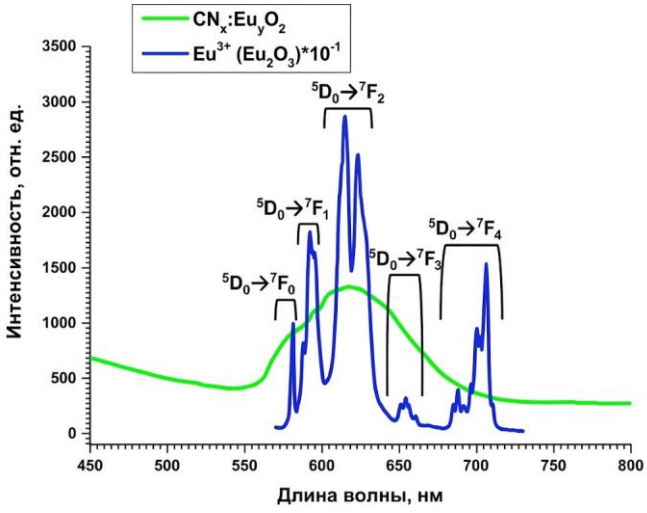
№ плёнки	I, mA	U, V	P, mTorr	T, ^{0}C	t, h	d, nm
1	56-57	400	50	235	1	580
2	45-47	425	36	220		530
3	62-63	425	48	300		600

Для измерений спектров люминесценции была собрана установка (рисунок), состоящая из ртутной лампы ДРТ-240 в качестве источника возбуждения, подключённой к возбуждающему монохроматору МДР-2, который позволял выделять необходимую полосу возбуждения. Излучение люминесценции образца регистрировалось ФЭУ, подключённой ко второму монохроматору МДР-2, регистрирующему, что позволило

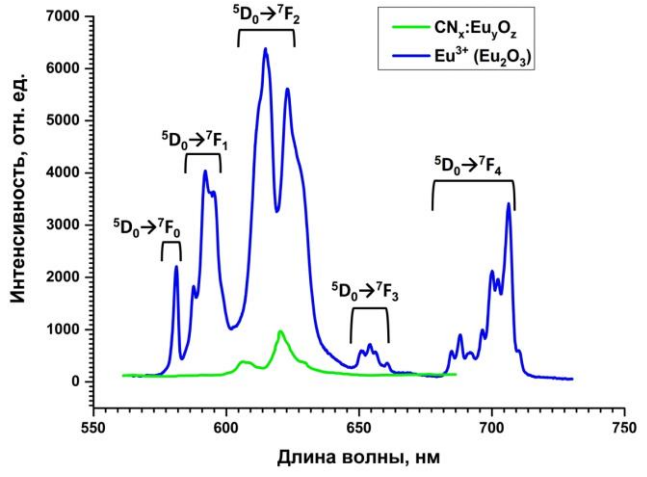
просматривать весь получаемый спектр. Также в составе установки была фокусирующая оптика, самописцы, блоки питания и т.д. Возбуждение люминесценции в образцах проводилось на длине волны 266 нм.



а



б



в

Рис. Спектры люминесценции плёнок $CN_x:Eu_yO_z$, зелёный, в сравнении с образцовым спектром чистого оксида европия, синий: а – плёнка №1, б – №2, в – №3

Сравнительный анализ спектров фотолюминесценции пленок CN_x:Eu_yO_z и эталонного кристаллического Eu_2O_3 показал значительное неоднородное уширение линий переходов $^5D_0 \rightarrow {}^7F_j$ иона Eu^{3+}. Это свидетельствует о высокой степени структурного разупорядочения и аморфизации матрицы, в которой ионы допанта занимают множество неэквивалентных позиций.

Снижение интенсивности люминесценции в пленках частично объясняется наличием высокочастотных колебаний связей C–H и N–H. Энергия возбуждения иона европия может эффективно передаваться на колебательные моды этих связей (процесс многофононной релаксации), что приводит к дополнительному безызлучательному тушению свечения по сравнению с безводородным эталоном Eu_2O_3.

Доминирование сверхчувствительного электрического дипольного перехода $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (610–630 нм) над магнитным дипольным переходом $^7F_1$ во всех образцах указывает на крайне низкую точечную симметрию окружения европия, лишенную центра инверсии. Это подтверждает эффективную координацию Eu^{3+} атомами азота и кислорода в разупорядоченной матрице карбонитрида.

Список литературы

1. Robertson J. Diamond-Like Amorphous Carbon / J. Robertson // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2002. – Vol. 37, No. 4–6. – P. 129–281.
2. Ferrari A. C. Interpretation of Raman Spectra of Carbon in Terms of sp2 and sp3 Bonding / A. C. Ferrari, J. Robertson // Physical Review B. – 2000. – Vol. 61, No. 20. – P. 14095.

УДК 678.027.3

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ FFF 3D-ПЕЧАТИ НА ДЕФЕКТЫ И РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АБС FDPLAST БЕЛОГО ЦВЕТА

Савицкая Ю.А., ORCID 0009-0003-1066-1814,
Юркин А.А., канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-2931-0224
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, РФ
juli.ska@mail.ru

Введение. Экструзионная 3D-печать термопластами по технологии FFF/FDM остаётся одним из наиболее доступных и распространённых методов аддитивного производства. АБС-сополимеры сохраняют позиции востребованных материалов благодаря сочетанию механической прочности, термостойкости и технологичности. Вместе с тем качество готовых изделий определяется совместным влиянием температуры сопла и

платформы, скоростных режимов, геометрии слоя, плотности заполнения и числа периметров. Для АБС характерны усадочные явления, коробление, потеря адгезии к столу, недоэкструзия и размерные отклонения. В работах [1-3] показано, что коробление и усадка АБС-изделий снижаются с ростом температуры платформы вследствие уменьшения термических напряжений. В [4] установлено, что ориентация при построении является наиболее значимым фактором размерной точности (вклад 75,89 %), тогда как толщина слоя и ширина растра вносят 11,87 % и 10,40 % соответственно.

Цель исследования – определить влияние режимов FFF-печати на дефектность и точность изделий из АБС FDplast белого цвета.

Основная часть. В качестве объекта исследования был выбран АБС-пластик FDplast белого цвета с плотностью 1,088 г/см^3 (ООО «Завод полимерных труб», Россия). Использовали как тестовые образцы полу-лопатку без периметров, полу-лопатку с периметрами и кубик 20×20×20 мм с заполнением 15, 30 и 100 %.

Оптимизацию температуры печати проводили методом температурной башни. Влияние скорости печати исследовали на 3D-принтере Total Z Anyform XL250-G3 при варьировании скорости от 60 до 200 мм/мин; остальные параметры (температура 230℃, ширина слоя 0,4 мм, количество периметров 3, шаблон заполнения – линии) оставались постоянными. Критерием служил угол отрыва от печатного стола и наличие видимых дефектов. Размерную точность оценивали по отклонению ширины слоя от заданного значения (0,34 мм для одного слоя, 0,68 мм для двух и 1,02 мм для трёх слоёв) на тестовом образце типа «лабиринт» и на реальном изделии (стенка коробчатого профиля) при изменяемой температуре 225-235℃. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139-69. Показатель текучести расплава определяли в соответствии с ГОСТ 11645-2021.

При стандартной температуре 220℃, нагрузкой 10 кг, и временем течения материала 30 с экспериментально получено значение ПТР 26 г/10 мин. Оптимальная температура для исследуемого материала составила 230℃. При этой температуре экспериментальный ПТР возрастает до 29 г/10 мин, а вязкость составляет 19,03 Па·с.

Установлены максимальные оптимальные скорости: для полу-лопаток без периметров – 160 мм/мин; для полу-лопаток с периметрами – 190 мм/мин; для кубиков с заполнением 15, 30 и 100 % – 190 мм/мин. При скорости 200 мм/мин угол отрыва для полу-лопатки с периметрами составил 5,7°; для кубиков – 5,7° (15 %), 7,9° (30 %) и 2,7° (100 %). Для полу-лопаток без периметров угол отрыва при скорости 170 мм/мин составил 3,4°. Наименьший угол отрыва среди всех исследованных материалов показал именно исследуемый АБС при печати кубика с заполнением 100 % (2,7°). Это свидетельствует о высокой устойчивости материала к отрыву при высоком заполнении. Полу-лопатки с периметром так же

показали себя стабильнее по сравнению с полу-лопатками без периметра, так как дефекты проявились в образцах при больших скоростях.

Усадочные дефекты и размерная точность исследованы для тестового образца типа «лабиринт». При одном слое ширина колеблется в диапазоне 0,52-0,54 мм; наиболее стабильные показатели – при 225 и 230℃. При двух слоях ширина составляет 0,38-0,40 мм; при 230 и 235℃ ширина уменьшается от первого сечения к последнему. При трёх слоях ширина находится в диапазоне 0,40-0,41 мм; при всех температурах наблюдается уменьшение ширины от первого сечения к последнему. Одиночный слой всегда шире, чем слой в изделии из двух или трёх слоёв; для двух и трёх слоёв разброс меньше, что объясняется лучшей стабилизацией, охлаждением и иным характером усадки.

Для реального изделия (стенка коробчатого профиля) получены данные: при одном слое его ширина составляет 0,47-0,48 мм; при двух – 0,81-0,82 мм; при трёх – 1,15-1,17 мм. Отклонение от заданной ширины значительно для всех вариантов, что указывает на усадочный характер дефекта. При этом макроснимки сечений показывают, что при печати в 2 и 3 слоя отсутствуют поры между слоями, тогда как у ряда других АБС-материалов (LIDER-3D, 2020-32, PA757) такие поры наблюдаются. Это важное преимущество исследуемого материала для изделий с несколькими периметрами.

Обобщённо: изделия толщиной в один слой (0,34 мм) имеют среднее отклонение около 0,2 мм от заданного значения; при увеличении числа слоёв до двух отклонение снижается до 0,05 мм, до трёх – до 0,04 мм. Таким образом, увеличение количества периметров повышает размерную точность и снижает дефектность.

Дополнительно исследовано влияние температуры (220-250℃), высоты слоя (0,1-0,3 мм) и ширины слоя (0,5 мм) на геометрические параметры. Показано, что высота готового изделия типа «лабиринт» при всех режимах не соответствует заданной примерно на 20 %; реальные размеры слоёв больше теоретических примерно на 10 %. Для ненаполненного АБС наименьшее отклонение высоты стенки достигается при высоте слоя 0,3 мм (от -1,3 до 3,3 %) и 0,2 мм (1,3-6,7 %), а также при температурах 240-250℃. В рамках исследования был проведён анализ относительно h/b – отношения заданной высоты слоя к заданной ширине слоя. Анализ параметра h/b показал, что минимальное отклонение по ширине соответствует h/b = 0,4 при температурах 220, 230 и 240℃ и 0,6 при 220, 240 и 250℃, а по высоте – h/b = 0,6 при 240 и 250℃. Эти закономерности могут быть использованы при настройке печати, поскольку исследуемый материал относится к ненаполненным АБС.

Заключение. Для АБС производства ООО «Завод полимерных труб» рекомендуются следующие технологические параметры FFF-печати: температура сопла 230℃ (диапазон 225-235℃), температура стола 110-

120℃, диаметр филамента 1,75 мм. Максимальная оптимальная скорость печати: 160 мм/мин для тонкостенных образцов без периметров; 190 мм/мин для образцов с периметрами и для кубических изделий с заполнением 15-100 %. При скорости 200 мм/мин угол отрыва от стола минимален для заполнения 100 % (2,7°) и для полу-лопатки с периметрами (5,7°). Увеличение числа слоёв (периметров) снижает среднее отклонение ширины: с 0,2 мм при одном слое до 0,05 мм при двух и 0,04 мм при трёх. В отличие от других исследованных АБС, у данного материала при печати в два и три слоя не обнаружены поры между слоями.

Список литературы

1. Tran, T. Q. Additive manufacturing of acrylonitrile butadiene styrene: Feedstock quality correlations, heat-induced shrinkage, and 4D printing applications / T. Q. Tran, X. Deng, C. Canturri [et al.] // Materials & Design. – 2026. – Vol. 263. – DOI: 10.1016/j.matdes.2026. 115532.
2. Rosli, A. A. Influence of bed temperature on warpage, shrinkage and density of various acrylonitrile butadiene styrene (ABS) parts from fused deposition modelling (FDM) / A. A. Rosli, R. K. Shuib, K. M. Ku Ishak [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2267, no. 1. – Art. 020072. – DOI: 10.1063/5.0015799.
3. Tamilarasan, A. D-optimal-based parametric study for improving the FFFed product quality of the ABS material / A. Tamilarasan, K. Radhika, D. Rajamani // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2024. – Vol. 38, no. 11. – P. 6225–6235. – DOI: 10.1007/s12206-024-1036-6.
4. Falguni, G. Process parameter optimization for fabrication of acrylonitrile butadiene styrene parts / G. Falguni, K. M. Yashwant // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Vol. 72. – P. 3474–3479. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.08.158.

УДК 669.36:621.777

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В АЗОТЕ НА СТРУКТУРУ МЕДИ ПРИ ОСАДКЕ

***Сенникова Л.Ф.*[1],** канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-6021-2318,
***Яшарова Е.В.*[1],** ORCID 0009-0002-8780-0918,
***Гангало А.Н.*[1,2],** канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-5683-1346
[1]ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
[2]ФГБНУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк, РФ
ludsennikova@mail.ru

Введение. Методы интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности равноканальное угловое прессование, позволяют формировать в металлах субмикрокристаллическую структуру, которая приводит к повышению прочностных свойств [1, 2]. Однако минимальный достижимый

размер зерна, а следовательно, и прочность при ИПД часто ограничен особенностями метода [1]. Для дальнейшего измельчения структуры применяют комбинацию различных схем деформирования, например равноканальное угловое прессование и гидроэкструзию, что позволяет дополнительно повысить прочность меди за счет формирования аксиальной текстуры [3, 4]. Другим подходом для повышения эффективности обработки является осуществление деформации при криогенных температурах, что подавляет процессы возврата [5, 6]. В связи с этим актуальным является исследование, направленное на оценку эффективности криогенной обработки на начальных этапах деформирования.

Цель данной работы – изучить влияние деформации осадкой на эволюцию структуры меди, оценить влияние предварительного охлаждения до криогенной температуры.

Основная часть. Материалом для исследования выступила предварительно отожжённая медь чистотой 99,9 %. В исходном состоянии была сформирована однородная равноосная структура с размером зерен 10-30 мкм. Из прутка вытачивались цилиндрические заготовки с диаметром d_0 и высотой h_0 – 15 мм. Осадку осуществляли на гидравлическом прессе с использованием гладких бойков в интервале деформаций $\varepsilon = ln\,(h_0/h_1) = 0.2\ldots1.0$ с шагом 0.2. Скорость осадки составляла 7 мм/с (средняя скорость деформации $\dot{\varepsilon} \approx 0.5 с^{-1}$). Анализ изменения структуры оценивали просвечивающей электронной микроскопии с использованием микроскопа JEOL JEM-200A и рентгеноструктурного анализа с использованием дифрактометра ДРОН-3М. Влияние структуры на свойства материала оценивали измерениями твердости по Виккерсу с использованием твердомера HV-5.

Влияние температуры и степени деформации на эволюцию параметров тонкой структуры и изменение твердости представлено на рис.

Как видно из представленных на рис. зависимостей, с ростом степени деформации для обоих температурных режимов происходит увеличение плотности дислокаций и величины микродеформации кристаллической решетки. При этом криогенная обработка обеспечивает более высокие значения этих характеристик по сравнению с деформацией при комнатной температуре. В частности, при ε = 1,0 плотность дислокаций в образцах, осаженных при 77 К, достигает $5{,}88\times10^{10}$ см$^{-2}$, что превышает соответствующий показатель для комнатной температуры ($4{,}06\times10^{10}$ см$^{-2}$) почти в 1,5 раза. Для деформации при 293 К выявлен спад плотности дислокаций при ε > 0,8, обусловленный разогревом материала в процессе деформации [7]. Измерения твердости (рис. в) показали монотонное возрастание с увеличением степени деформации. Твердость после осадки при комнатной температуре достигает 114,7 HV, а криогенная обработка повышает этот показатель до 122,6 HV.

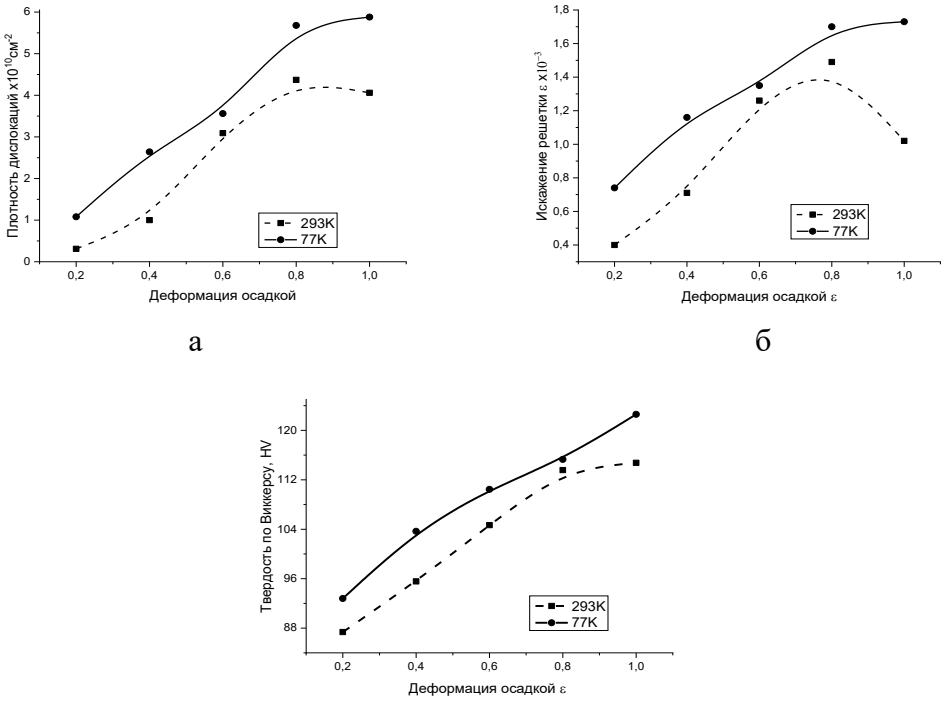


Рис. Влияние температуры и степени деформации на плотность дислокаций (а), искажение кристаллической решетки (б) и твердость по Виккерсу (в) меди

Данные просвечивающей электронной микроскопии свидетельствуют о том, что деформация осадкой при 293 К ($\varepsilon \sim 1{,}0$) приводит к образованию неоднородной микроструктуры, характеризующейся средним поперечным размером структурных элементов около 0,5 мкм и разветвленной сеткой субграниц внутри зерен. Снижение температуры деформации способствует более интенсивному дроблению: средний размер зерна сокращается до 0,3 мкм, а в микроструктуре фиксируются микродвойники, что свидетельствует о включении дополнительного механизма фрагментации. Наряду с двойникованием, измельчению способствует образование деформационно-индуцированных границ, рассекающих крупные зерна на более мелкие блоки. Для образцов, деформированных при криогенных температурах, характерна повышенная плотность дислокаций, что указывает на сдерживание поперечного скольжения и, соответственно, на замедление динамического возврата.

Заключение. Предварительное охлаждение меди до криогенной температуры перед осадкой позволяет интенсифицировать измельчение зеренной структуры на начальных этапах деформации за счет подавления возврата и активизации двойникования. Твердость после криогенной осадки на 7 % выше, чем при комнатной. Полученные результаты могут быть использованы при разработке комбинированных режимов деформационно-термической обработки меди.

Информация о финансовой поддержке: *Исследования проводились в рамках государственного задания FREZ-2026-0005.*

Список литературы

1. Edalati K. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances / K. Edalati, Z. Horita, A. Bachmaier [et al.] // Materials Research Letters. – 2022. – Vol. 10, No. 4. – P. 163-256. – DOI 10.1080/21663831.2022.2029779. – EDN ADJKQD.
2. Сенникова Л. Ф. Влияние гидроэкструзии на структуру и механические свойства меди М0б, предварительно обработанной равноканальным угловым прессованием / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, В. М. Ткаченко [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2025. – № 3(123). – С. 31-37. – DOI 10.22349/1994-6716-2025-123-3-31-37. – EDN ERNAHS.
3. Гангало А. Н. Влияние гидропрессования на механические свойства ультрамелкозернистой меди / А. Н. Гангало, Е. В. Яшарова, Л. Ф. Сенникова [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2025. – № 10. – С. 19-27. – DOI 10.31044/1814-4632-2025-10-19-27. – EDN SGFZQV.
4. Яшарова Е. Повышение сдвигового напряжения разрушения субмикрокристаллической меди методом гидроэкструзии / Е. Яшарова, А. Гангало, В. Суровицкий и др. // Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedenia. – 2026. – No. 1(23). – P. 124-132. – DOI 10.25712/astu.1811-1416.2026.01.013. – EDN PTKMJE.
5. Huang, Y. The effect of cryogenic temperature and change in deformation mode on the limiting grain size in a severely deformed dilute aluminium alloy / Y. Huang, P. B. Prangnell // Acta Materialia. – 2008. – Vol. 56, No. 7. – P. 1619-1632. – DOI 10.1016/j.actamat.2007.12.017. – EDN MMIAJD.
6. Сенникова Л. Ф. Структура и твердость меди М0б после деформационно-термической обработки при комнатной и криогенной температурах / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, Г. К. Волкова [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2026. – № 2(126). – С. 27-34. – DOI 10.22349/1994-6716-2026-126-2-27-34. – EDN YFFOSG.
7. Iasharova, E., Gangalo, A.N., Vasiliev, S. et al. Relaxation of the Strength Properties of Ultrafine-Grained Copper during Hydrostatic Extrusion. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 90. – No. 8. – P. 1334–1339 (2026). https://doi.org/10.1134/S106287382670111X

УДК 669.71: 539.89

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОГО СПЛАВА АМц ПРИ ГИДРОЭКСТРУЗИИ

***Суровицкий В.Д.*[1],** ORCID 0009-0009-0722-4035,
***Затирка М.А.*[1,2],** ORCID 0009-0003-8270-4748,
***Кононенко В.В.*[1],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0009-0008-1554-9780,
***Соколов К.И.*[3],** ORCID 0009-0000-0405-6632
[1]ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
[2]ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
[3]ФГБНУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк, РФ
suroq94@gmail.com

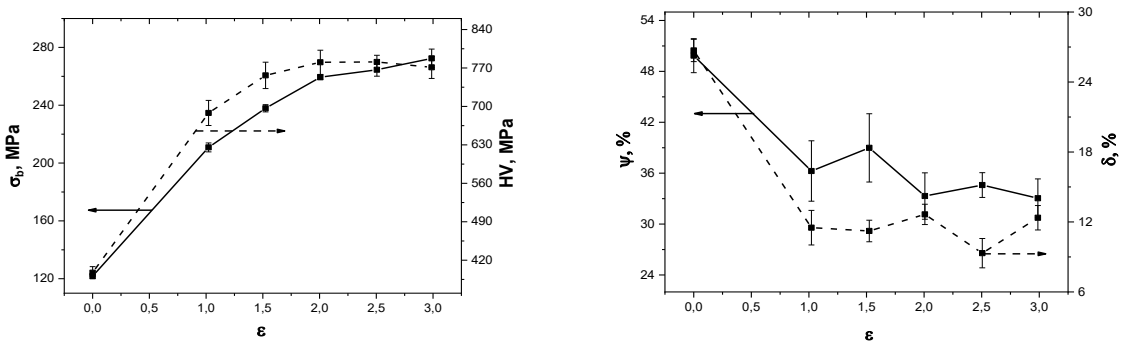
Введение. Сплав алюминия с марганцем АМц нашёл широкое применение в разных секторах промышленности благодаря устойчивости к

коррозии, способности хорошо свариваться и технологичной пластичности [1, 2]. При этом рассматриваемый материал принадлежит к группе термически неупрочняемых, а потому рост его прочности возможен лишь посредством наклёпа, возникающего при пластическом деформировании. Одним из перспективных способов обработки металлов давлением считается гидроэкструзия (ГЭ): она даёт возможность заметно повысить уровень механических характеристик за счёт достижения больших степеней деформации в условиях всестороннего сжатия [3, 4]. Исследования, посвящённые ГЭ горячепрессованного АМц, продемонстрировали высокую результативность данной технологии для упрочнения сплава [5, 6]. Тем не менее воздействие гидроэкструзии на литой АМц, для структуры которого типичны крупные дендритные зёрна, ликвационные зоны и грубые интерметаллидные включения, остаётся изученным в недостаточной мере.

Цель – изучить, как гидроэкструзия влияет на механические свойства литого сплава АМц в широком диапазоне истинных степеней деформации.

Основная часть. Эксперимент проводили на слитке сплава АМц. Его химический состав: марганец – 1,05 %, железо – 0,56 %, кремний – 0,37 %, медь – 0,17 %, остальное приходится на алюминий. Деформацию осуществляли методом гидроэкструзии, варьируя истинную степень деформации в пределах 1,0–3,0. Особое внимание уделяли тепловому режиму: скорость деформирования не превышала 1 мм/с. Такой ограничитель необходим, так как в противном случае выделяемое тепло подняло бы температуру экструдата выше 200 °C, а при этой температуре, как отмечено в работе [7], сплав АМц теряет прочность. Для оценки механических свойств применяли растяжение по ГОСТ 1497-84 и измерение твёрдости по Виккерсу. Микроструктурные изменения фиксировали методом сканирующей электронной микроскопии.

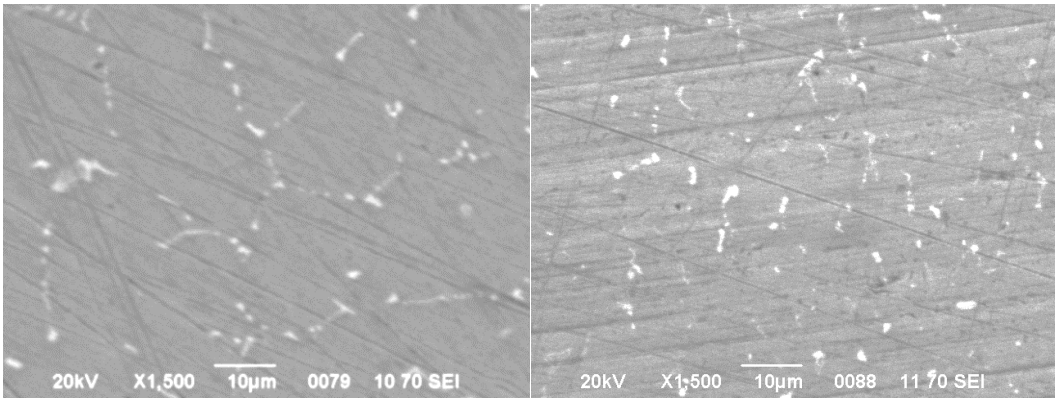
На рис. 1 показано, как гидроэкструзия влияет на механические характеристики АМц. Литой сплав имел предел прочности σ_b = 122 MPa и твёрдость HV = 397 MPa. Деформация ГЭ сопровождается упрочнением, твёрдость интенсивно растет до ε = 1,5 и далее держится на уровне HV = 760 MPa, почти не реагируя на рост деформации. В отличие от твердости повышение предела прочности при ГЭ наблюдается до больших значений деформации, достигая максимального уровня $\sigma_b \sim 265$ MPa при ε = 2,5–3,0 (рис. 1а). Пластичность исходного литого материала находится на высоком уровне – относительное сужение ψ = 49,8 %, относительное удлинение δ = 26,7 %. На начальном этапе гидроэкструзии пластические свойства резко снижаются, при ε = 1 относительное сужение уменьшается до $\psi \sim 36$ %, а относительное удлинение – до $\delta \sim 11$ %. Дальнейший рост степени деформации ГЭ не приводит к заметным изменениям пластичности, что свидетельствует о стабилизации структурного состояния сплава.



а б

Рис. 1. Влияние деформации ГЭ литого алюминиевого сплава АМц на прочность – а, пластичность – б

На рис. 2 показана структура алюминиевого сплава в исходном состоянии и после обработки ГЭ ε = 2.



а б

Рис. 2. Микроструктура алюминиевого сплава АМц в литом состоянии – а, после ГЭ с ε = 2 – б

Анализ микроструктуры показывает, что исходный алюминиевый сплав АМц характеризуется неравномерным распределением грубых вытянутых включений интерметаллидной фазы AlFe(Mn)Si. В процессе гидроэкструзии вытянутые кристаллы второй фазы активно разрушаются, их длина сокращается с ~ 10 мкм до ~ 2 мкм при ε = 1,0. При деформации $\varepsilon \geq 2{,}0$ форма частиц второй фазы становится практически равноосной, фрагменты интерметаллидов равномерно перераспределяются по объёму материала, что способствует снижению концентрации напряжений у частиц при последующем нагружении и обеспечивает дополнительное упрочнение за счёт дисперсных выделений.

Заключение. Таким образом, гидроэкструзия позволяет повысить твёрдость по Виккерсу более чем на 90 %, а предел прочности – более чем на 110 %, сохраняя при этом приемлемый уровень пластических характеристик по сравнению с исходным литым состоянием. Упрочнение обусловлено как измельчением алюминиевой матрицы, так и фрагментацией вытянутых включений AlFe(Mn)Si и их равномерным распределением в матрице.

Информация о финансовой поддержке: *Исследования проводились в рамках государственного задания FREZ-2024-0001.*

Список литературы

1. Huang H. Evolution of precipitation during different homogenization treatments in a 3003 aluminum alloy / H. Huang, B. Ou // Materials & Design. – 2009. – Vol. 30 (7). – P. 2685-2692. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.12.027 EDN: KUKEBJ
2. Tan Y. B. A study on microstructure and mechanical properties of AA 3003 aluminum alloy joints by underwater friction stir welding / Y. B. Tan, X. M. Wang, M. Ma [et al.] // Materials Characterization. – 2017. – Vol. 127. – P. 41-52. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.02.024
3. Яшарова Е. Повышение сдвигового напряжения разрушения субмикрокристаллической меди методом гидроэкструзии / Е. Яшарова, А. Гангало, В. Суровицкий и др. // Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedenia. – 2026. – No. 1(23). – P. 124-132. DOI: 10.25712/astu.1811-1416.2026.01.013 EDN: PTKMJE
4. Gangalo A. N. Effect of Hydrostatic Extrusion on the Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Copper / A. N. Gangalo, E. V. Yasharova, L. F. Sennikova [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2026. – Vol. 2026, No. 1. – P. 147-154. DOI: 10.1134/S0036029526700229 EDN: PBANYJ
5. Сенникова Л. Ф. Влияние разовой степени деформации гидроэкструзией на механические свойства сплава АМц, предварительно обработанного равноканальным угловым прессованием / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, Е. А. Свиридова [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2024. – № 4(87). – С. 71-76. EDN: EWQYCU
6. Сенникова, Л. Ф. Особенности влияния условий деформации на структуру и физико-механические свойства сплава АМЦ / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, Г. К. Волкова // Физика и техника высоких давлений. – 2023. – Т. 33, № 4. – С. 116-120. EDN: RNHLEN
7. Сенникова, Л. Ф. Термостабильность сплава АМЦ после разных схем пластической деформации / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало // Физика и техника высоких давлений. – 2024. – Т. 34, № 2. – С. 96-102. EDN: UZXWWK

УДК: 537.87: 535.394

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ЭФФЕКТА ГУСА–ХЕНХЕН В СЛУЧАЕ НОРМАЛЬНО ПАДАЮЩЕГО ВОЛНОВОГО ПУЧКА

***Тарасенко А.С.*[1],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0002-3258-8174,
***Сухорукова О.С.*[1,2],** канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0009-0009-6471-5033,
***Тарасенко Т.Н.*[1],** канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0009-0001-6624-8485
[1] ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
[2] ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
tos1980@mail.ru

В последние годы наблюдается широкий интерес к изучению латерального смещения пучка объемных электромагнитных волн,

падающего в условиях полного внутреннего отражения (ПВО) на границу раздела оптически прозрачных сред (эффект Гуса-Хенхен [1]).

Ранее в работах [2,3] теоретически была продемонстрирована принципиальная возможность формирования в условиях ПВО эффекта Гуса–Хенхен для случая нормального падения пучка объемных волн ТЕ типа на поверхность оптически прозрачной среды при условии, что она обладает гиротропией (собственной или вынужденной).

Однако до сих пор было неясно, является ли гиротропия отражающей среды необходимым условием для формирования в условиях ПВО латерального сдвига в случае нормально падающего пучка. При этом расчеты, выполненные в [2,3], содержали существенное с точки зрения целей нашей работы ограничение: антиферромагнитная (АФМ) среда, рассмотренная в [2,3] в качестве отражающей, по своим электродинамическим свойствам являлась центросимметричной.

В данной работе с помощью метода стационарной фазы [4] показано, что в условиях полного внутреннего отражения магнитоэлектрическое взаимодействие может приводить к сдвигу Гуса-Хенхен для пучка объемных волн ТМ (ТЕ) типа, нормально падающего на границу раздела прозрачных, негиротропных сред.

В работе рассматривалась граница раздела двух полупространств с нормалью **q**, при этом считалось, что верхнее занято немагнитной оптически изотропной средой с материальными соотношениями вида:

$$\widetilde{\mathbf{B}}_i = \widetilde{\mathbf{H}}_i, \qquad \widetilde{\mathbf{D}}_i = \widetilde{\varepsilon}\widetilde{\mathbf{E}}_i, \qquad (i = x, y, z). \qquad (1),$$

где $\widetilde{\varepsilon} = \text{const}$ диэлектрическая проницаемость, **B** и **D** – вектора магнитной и электрической индукции, **H** и **E** – магнитное и электрическое поле, тильда определяет величины, относящиеся к данной среде.

Для рассмотрения был выбран случай, когда уравнения связи нижней оптически менее плотной среды можно представить в виде (индексы верхние индексы “*” и “Т” отвечают соответственно комплексному сопряжению и транспонированию):

$$\mathbf{B} = \overline{\overline{\mu}}\mathbf{H} + \overline{\overline{A}}^{*}\mathbf{E}\ ; \qquad \mathbf{D} = \overline{\overline{\varepsilon}}\mathbf{E} + \overline{\overline{A}}^{T}\mathbf{H} \qquad (2),$$

где $\overline{\overline{\mu}}$ и $\overline{\overline{\varepsilon}}$ – тензоры магнитной и диэлектрической проницаемостей, $\overline{\overline{A}}$ – магнитоэлектрический тензор.

С учетом (2) из уравнений Максвелла следует, что в условиях ПВО для волны с поляризацией α параметр η_α имеет структуру $\eta_\alpha = \eta'_\alpha - i\eta''_\alpha$; $(\eta''_\alpha)^2 > 0$. При $\eta'_\alpha \neq 0$ амплитуда эванесцентной волны с поляризацией α, по мере удаления от границы раздела сред, может не просто экспоненциально убывать с показателем $\eta''_\alpha \neq 0$, но и одновременно испытывать пространственные осцилляции (с периодом $2\pi/\eta'_\alpha$), если $\eta'_\alpha < \eta''_\alpha$.

В представленной работе определены минимально необходимые условия для усиления величины латерального смещения отраженного пучка волн ТМ (ТЕ) типа (9)-(10) в случае схемы Отто [5]. Будем считать, что на границе раздела полуограниченных немагнитной и магнитоэлектрической сред находится слой изотропной среды, при этом, предположим, что в ней возможно формирование нераспространяющейся ($k_\perp = 0$) эванесцентной волны соответствующей поляризации $\alpha = s, p$. Поэтому, если для описанной среды поверхностный импеданс (для волны ТМ типа, а=р $\alpha = s, p$) или поверхностную волновую проводимость (для волны ТЕ типа а=s) обозначить как $\overline{Z}_\alpha$ ($\alpha = s, p$), а обратную глубину локализации эванесцентной волны ТМ (ТЕ) типа как $\overline{\eta}_\alpha$ (в рассматриваемых условиях ПВО одновременно $\eta_\alpha^2 > 0, \overline{\eta}_\alpha^2 > 0$), то в этом случае во френелевский коэффициент отражения

$$R_\alpha = \frac{\widetilde{Z}_\alpha - iZ_\alpha}{\widetilde{Z}_\alpha + iZ_\alpha} \tag{3}$$

вместо импеданса магнитоэлектрической среды Z_α будет входить входной импеданс структуры «слой – полуограниченный магнитоэлектрик» ($\alpha = p, s$):

$$Z_{вх\alpha} = \frac{T_{21}^\alpha + T_{22}^\alpha Z_\alpha}{T_{11}^\alpha + T_{12}^\alpha Z_\alpha}, \tag{4},$$

$$\overline{\overline{T}} = \begin{pmatrix} ch(\overline{\eta}_\alpha d) & \dfrac{sh(\overline{\eta}_\alpha d)}{\overline{Z}_\alpha} \\ \overline{Z}_\alpha sh(\overline{\eta}_\alpha d) & ch(\overline{\eta}_\alpha d) \end{pmatrix}; \tag{5}.$$

На основании полученных данных сделан вывод о том, что в отражающей (магнитоэлектрической) среде направление потока энергии вдоль границы раздела сред, связанного с возбуждаемой эванесцентной волной $\left(\langle \mathbf{S}_\alpha \rangle \mathbf{b}\right)$ ($\alpha = p, s$), совпадает с направлением пространственного смещения вдоль границы раздела сред отраженного пучка объемных волн той же поляризации.

Таким образом, в данной работе с помощью метода стационарной фазы [4] впервые показано, что для нормально падающего извне на поверхность прозрачного негиротропного диэлектрика пучка объемных волн ТМ (ТЕ) типа эффект Гуса–Хенхен в условиях ПВО возможен, если отражающая среда не является гиротропной, но обладает магнитоэлектрическим взаимодействием. В этом случае поток энергии вдоль границы раздела сред, связанный с возбуждаемой в магнитоэлектрике нераспространяющейся ($k_\perp = 0$) вытекающей эванесцентной волной, отличен от нуля и его знак совпадает со знаком пространственного смещения пучка.

Список литературы

1. Goos F. Experimental proof of the lateral displacement of a light beam upon total reflection / F. Goos, H. Hanchen // Ann Phys. – Leipzig., 1947. –V. 1. – P. 333-336.
2. Lima F. Lateral shift of far infrared radiation on normal incidence reflection off an antiferromagnet / F. Lima, T. Dumelow, P. da Costa [et al.] // Europhys. Lett., 2008. – V. 83. – № 1. – P. 1-6.
3. Lima F. Power flow associated with the Goos-Hänchen shift of a normally incident electromagnetic beam reflected off an antiferromagnet / F. Lima, T. Dumelow, E. L. Albuquerque [et al.] // Physical Review B. – 2009. – Vol. 79. – P. 155124.
4. Artmann K. Berechnung der Seitenversetzung des totalreflektierten Strahles / K. Artmann // Ann Phys. – Leipzig., 1948.–V. 2. – P. 87-97.
5. Zayats A. V. Nano-optics of surface plasmon polaritons / A. V. Zayats, I. I. Smolyaninov, A. A. Maradudin // Physics Reports. – 2005. – Vol. 408. – P. 131–314.

УДК 539.4.015.1, 539.531

ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗЕРЕННУЮ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ

***Ткаченко В.М.*[1],** канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0002-6831-3244,
***Бережной Я.А.*[1,2], *Сапронов А.Н.*[1]**
[1]ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
[2]ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
yar.berezhnoy@mail.ru

Введение. Актуальность вопросов получения и исследования материалов с нанокристаллической и субмикрокристаллической (СМК) структурой продиктована проявлением этими материалами высоких физико-механических и технологических свойств [1, 2]. Комбинированные методы обработки, сочетающие интенсивную пластическую деформацию с классическими методами обработки металлов давлением, позволяют улучшить свойства материалов [3, 4]. Проведение термомеханической обработки позволяет снизить нагрузку на инструмент и повысить пластичность обрабатываемого материала.

Цель данной работы – установление закономерностей влияния температуры и степени деформации разных видов обработки на изменение зеренной структуры и физико-механических свойств субмикрокристаллической меди, полученной методом винтовой экструзии.

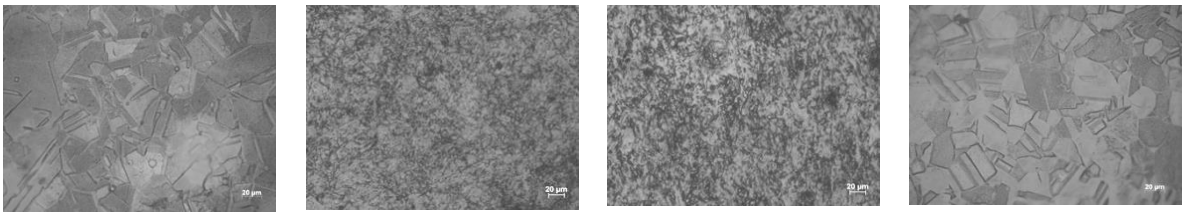
Основная часть. В качестве материала для исследований использовалась медь марки М1 (химический состав в %: Cu – 99.9%; Fe < 0.005; Ni < 0.002; S < 0.004; As < 0.002; Pb < 0.005; Zn < 0.004; O < 0.05; Sb < 0.002; Bi < 0.001; Sn < 0.002). Термическая обработка

осуществлялась в печи СНОЛ 7.2/1100 при температуре 600°С в течение 2 часов. Субмикрокристаллическое состояние меди достигалось обработкой методом винтовой экструзии (ВЭ) при комнатной температуре до степени деформации e=5.8.

Реализация гидростатического прессования (ГП) осуществлялась путем продавливания цилиндрической заготовки через коническую матрицу со значением половины угла конусности (угол между образующей конуса и его осью) α/2 = 10°. В качестве рабочей жидкости при ГП использовалось индустриальное масло. Данная обработка проводилась поэтапно при комнатной температуре до степени деформации e=1.0 с шагом деформации 0.5 на каждом этапе.

Термомеханическая обработка выполнялась путем горячего прессования в контейнере с конической матрицей, имеющей значение половины угла конусности α/2 = 30°. Значение истинной деформации за один проход составляло e = 2.0. Горячее прессование осуществлялось при температуре контейнера 400°С с предварительным разогревом заготовки до 600°С.

Влияние разных видов обработки на зеренную структуру меди, исследуемую с помощью оптической микроскопии, показано на рис. 1.



а б в г

Рис. 1. Структура меди после отжига (а), винтовой экструзии (б), сочетания винтовой экструзии с гидропрессованием (в) и горячего прессования (г)

Показано, что деформационная обработка винтовой экструзией и комбинированием винтовой экструзии с гидропрессованием приводит к сильному измельчению структурных элементов в 8.5 и 11.3 раза соответственно. При горячем прессовании развиваются рекристаллизационные процессы, приводящие к формированию крупнозернистой структуры с размером структурных элементов ~ 30 мкм.

Структурные изменения, происходящие при рассматриваемых видах обработки, по-разному влияют на физико-механические свойства меди. Влияние гидростатических и термомеханических воздействий на плотность меди с крупнозернистой и СМК структурой показана на рис.2. При винтовой экструзии наблюдается некоторое снижение плотности меди из-за вносимых дефектов деформационного характера. Реализуемые при гидропрессовании высокие всесторонние давления способствуют залечиванию дефектов и уплотнению материала.

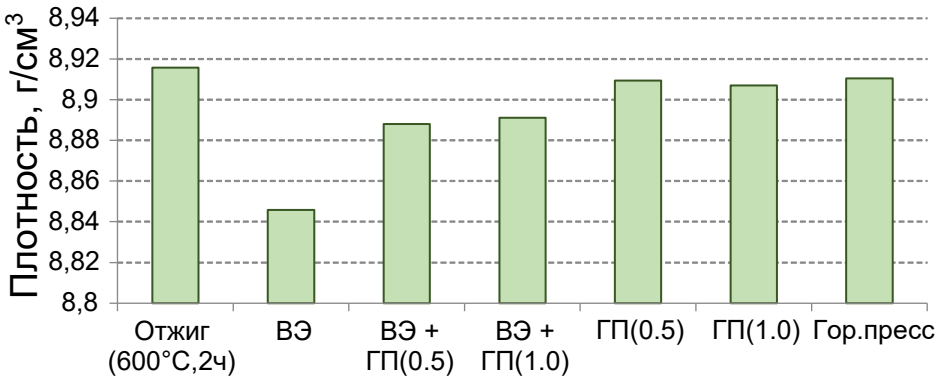


Рис. 2. Изменение плотности меди после разных видов обработки

Зависимость изменения твердости по Виккерсу меди при разных видах и степени обработки представлена на рис. 3. Деформационные методы обработки, осуществляемые при комнатной температуре, приводят к повышению твердости материала в 2.5 раза с использованием метода винтовой экструзии и в 2.7 раз при применении комбинированной обработки. В зависимости от условий проведения обработки горячее прессование сопровождается динамическим упрочнением и динамическим разупрочнением. В условиях проводимого эксперимента охлаждение обработанной меди происходило в естественных условиях (на воздухе). В этих условиях успевает произойти статическая рекристаллизация, что привело к возврату исследуемых характеристик структуры и свойств меди на уровень отожженного материала.

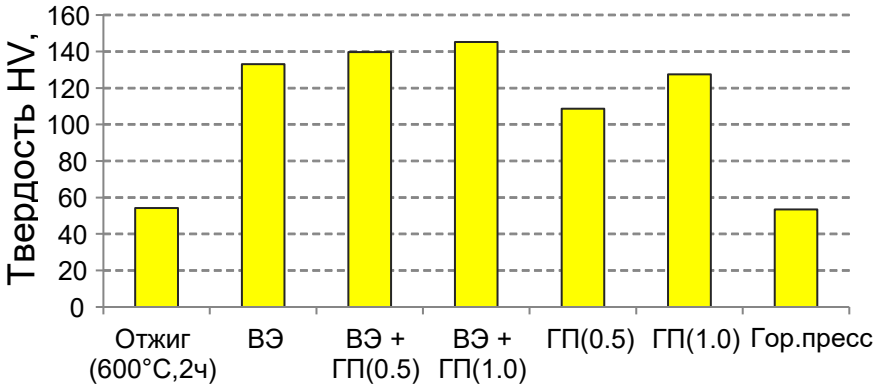


Рис. 3. Зависимость твердости меди от вида обработки и степени деформации

Заключение. Исследовано влияние гидростатического и горячего прессования на изменение зеренной структуры и физико-механических свойств субмикрокристаллической меди, полученной методом винтовой экструзии. Показано, что гидропрессование приводит к сильному измельчению структурных элементов и повышению прочностных свойств, а реализуемые при ГП высокие всесторонние давления способствуют уплотнению материала. При горячем прессовании развиваются рекристаллизационные процессы, приводящие к формированию

крупнозернистой структуры и значений физико-механических свойств на уровне отожженного состояния.

Список литературы

1. Валиев, Р. З. Объёмные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М: Академкнига, 2007. – 398 с. – ISBN 978-5-94628-217-8.
2. Vailev, R. Z. Using Severe Plastic Deformation to Produce Nanostructured Materials with Superior Properties / R. Z. Vailev, B. Straumal, T. G. Langdon // Annual Review of Materials Research. – 2022. – Vol.52, Iss.1. – P. 357-382. – DOI: 10.1146/annurev-matsci-081720-123248.
3. Polyakov, A. V. Fatigue life and failure characteristics of an ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy processed by ECAP and extrusion / A. V. Polyakov, I. P. Semenova, Y. Huang [et al.] // Adv. Eng. Mater. – 2014. – Vol. 16, Iss. 8. – P. 1038–1043. – DOI:10.1002/adem.201300530.
4. Bohluli, H. An investigation on twist extrusion followed by forward extrusion in production of aluminum-copper bimetallic bar / H. Bohluli, K. Khalili, S.M.H. Seyedkashi // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2021. – Vol. 33. – P. 52–62. – DOI:10.1016/j.cirpj.2021.02.010.

УДК 615.849, 548, 54.03, 534-8+539.3+ 621.3

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ И ДИСЛОКАЦИОННАЯ МИКРОПЛАСТИЧНОСТЬ В УМЗ МЕДИ

Токий Н.В., канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0002-2965-6279,
Носолев И.К., ORCID 0000-0002-5566-0685,
Резников А.В., Чернявская Н.В.
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
nvt1976@mail.ru

Введение. Наиболее полную информацию о зарождении и развитии на ранних стадиях процессов деградации эксплуатационных свойств УМЗ – материалов, обусловленных метастабильностью их структурной конфигурации, сформировавшейся под действием высокоэнергетических воздействий различного вида ИПД, можно получить, исследуя поведение этих материалов в области низких температур и микропластических деформаций методом ВТ, которое, как явление, позволяет судить о тонких деталях реальной структуры материалов.

Цель работы. Работа посвящена исследованию процессов дислокационной релаксации и гистерезисного ВТ и дефекта модуля упругости (ДМУ) в меди, прошедшей обработку ИПД.

Материалы и образцы. Исследовались образцы из технически чистой меди марки М1, подвергнутых ИПД с различной степенью деформации.

Из исходного материала в состоянии поставки, а также после отжига и ИПД, для проведения измерений внутреннего трения были вырезаны образцы прямоугольной формы размером 3×3×30 мм на искрорезном станке. Для ультразвуковых измерений длина образцов была уменьшена до половины длины волны полуволнового вибратора «кварц+образец» с резонансной частотой 102400 Гц.

На рисунке 1 представлена эволюция микроструктуры меди после отжига (а), после процесса экструзии (б) и после 12 проходов РКУП (в). Микроструктура полученных образцов была изучена с использованием оптического электронного микроскопа Axiovert 40 MAT.

Методика эксперимента. Измерения осуществлялись резонансным методом двойного составного вибратора [1]. Резонатор состоял из пьезокварца, служащего для возбуждения и приема механических колебаний, и исследуемого образца. Пьезокварц представлял собой монокристаллический брусок размером 3x3x34 мм^3, вырезанный таким образом (XYS/18,5^0-срез), что в нем под действием переменного электрического напряжения возбуждались продольные механические колебания на частоте 102 кГц. Измерения проводились в интервале температур 80–300 К. Погрешность измерения логарифмического декремента колебаний не превышает 10 %. Погрешность определения модуля упругости (модуль Юнга), обусловленная точностью измерения резонансной частоты и длины образца, не превышает 0.06 %.

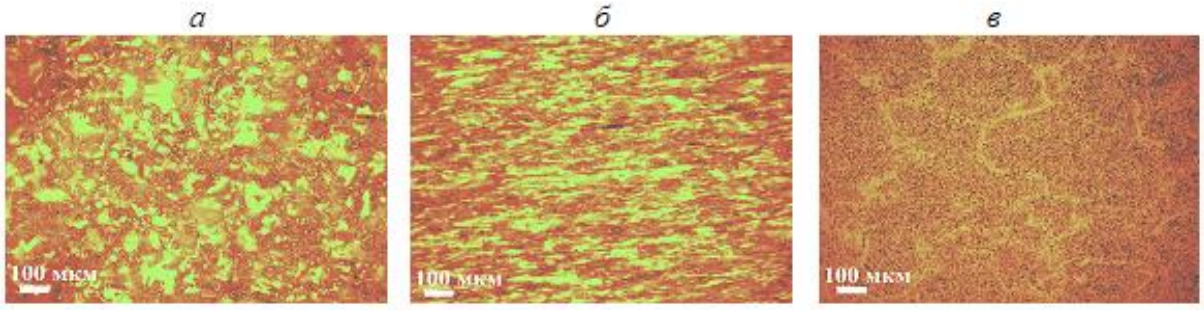


Рис. 1. Микроструктура меди М1, а – после отжига; б – после процесса экструзии; в – после РКУП 12

Исследовались температурные зависимости логарифмического декремента δ и модуля упругости М при деформации $\varepsilon=1\cdot10^{-7}$ (рис. 2), а также амплитудные зависимости дефекта модуля упругости ΔМ/М при деформациях $\varepsilon = 2\cdot10^{-8} – 6\cdot10^{-4}$ (рис. 3).

Логарифмический декремент колебаний δ и амплитуда относительной циклической деформации образца ε рассчитывались по формулам [1]:

$$\delta=\left(\frac{2\omega_k\cdot d_{12}{}^k}{s_{22}}\right)^2\cdot\frac{R_n}{\nu_1\cdot m_{св}};\qquad R_n=R\cdot\left(\frac{U}{U_R}-1\right);\quad \varepsilon=\frac{s_{22}}{2\omega_k\cdot d_{12}{}^k\cdot l_0\cdot\nu_1}\cdot\frac{U_R}{R}$$

где $\omega_к$ – толщина пьезокварца; d_{12}^k – пьезоэлектрический модуль кварца; s_{22} – постоянная упругости кварца; v_1 – резонансная частота кварца; R_n – эквивалентное сопротивление кварца в момент резонанса; R = 1.3 кОм – сопротивление, включённое последовательно с кварцем; U – падение напряжения на участке «пьезокварц – сопротивление R»; U_R – падение напряжения на сопротивлении R; $m_{св}$ – масса составного вибратора; l_0 – длина образца.

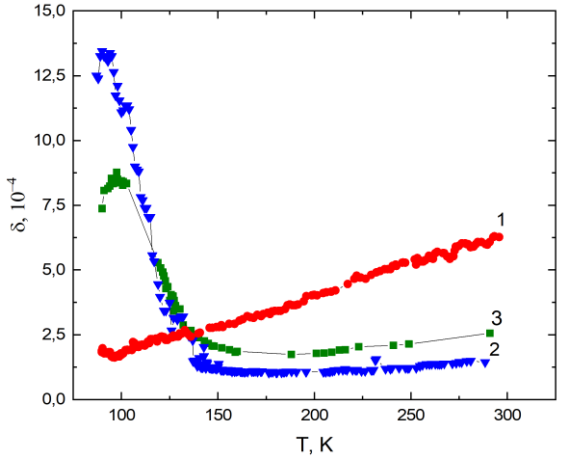


Рис. 2. Температурная зависимость декремента затухания исследуемых образцов: 1 – отожжённый, 2 – экструдированный, 3 – в состоянии поставки

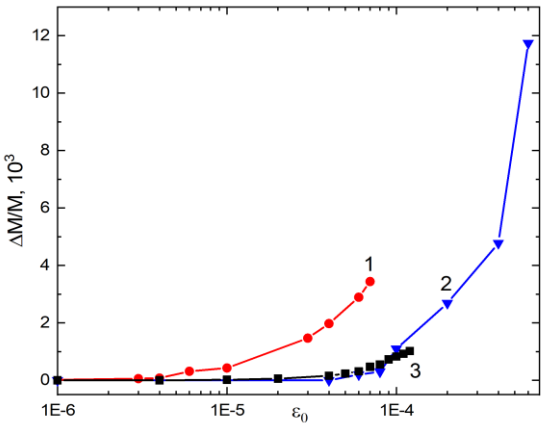


Рис. 3. Амплитудная зависимость дефекта модуля упругости исследуемых образцов: 1 – отожжённый, 2 – экструдированный, 3 – деформированный РКУП 12.

Результаты измерений и их обсуждение. Анализ температурных зависимостей декремента затухания δ(T), представленных на рисунке 2, выявил наличие низкотемпературных пиков внутреннего трения в образцах в состоянии поставки (92 К) и после экструзионной деформации (98 К). Исчезновение этих пиков в результате термической обработки (отжиг при 873 К в течение 2 часов) подтверждает их дислокационное происхождение и указывает на принадлежность к релаксационным пикам Бордони. Наблюдаемое явление определяется внутренними свойствами дислокаций: релаксация связана с термоактивированным образованием пар перегибов (kink pairs) на дислокационных линиях [2].

Из рис. 3 видно, что ДМУ растёт с увеличением амплитуды деформации, но характер роста различается для образцов с разной структурой. Образец из отожженной меди обладает наиболее ранним порогом активации, образец после экструзии выделяется наибольшим подъемом и максимальной величиной дефекта. Образец после РКУП 12 показывает наилучшую стабильность, что может быть обусловлено ограничением подвижности дислокаций в сформированной УМЗ структуре.

Заключение. Характер полученных экспериментальных зависимостей позволяет с уверенностью сделать вывод о дислокационной природе наблюдаемых явлений, которые адекватно описываются в рамках

существующих теоретических моделей ВТ [3, 4]. Обработка полученных экспериментальных зависимостей в рамках существующих дислокационных моделей ВТ, позволяет определить термоактивационные параметры процессов, контролирующих механизмы дислокационной релаксации и гистерезиса УМЗ-материалов в области низких температур.

Информация о финансовой поддержке: *Исследования проводились в рамках государственного задания ФГБНУ ДОНФТИ.*

Список литературы

1. Никаноров, С. П. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов / С. П. Никаноров, Б. К. Кардашёв. – Москва: Наука, 1985. – 250 с.
2. Niblett, D. H. The internal friction of cold-worked copper at low temperatures / D. H. Niblett, J. Wilks // Philosophical Magazine. – 1957. – Т 2, № 24. – С. 1427–1444. – DOI: 10.1080/14786435608238120.
3. Granato, A. Theory of mechanical damping due to dislocations / A. Granato, K. Lücke // Journal of Applied Physics. – 1956. – Т. 27, №6. – С. 583–593. – DOI: 10.1063/1.1722436.
4. Инденбом, В. Л. / К теории дислокационного гистерезиса / В. Л. Инденбом, В. М. Чернов // В сб.: Механизмы релаксационных явлений в твёрдых телах. – М., Наука, 1972. – С. 87. – EDN: LCWYFS.

УДК: 53.092, 53.096, 536.1, 536.4, 536.6, 536.7, 536-3.

ОСОБОГО ВИДА НЕТРИВИАЛЬНЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Червинский Д.А., Христов А.В., канд. физ.-мат. наук,
Шелест В.В., канд. физ.-мат. наук
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
chervin@dfti.donbass.com

Введение. С использованием методологии якобианов определены нормированные на единицу двухкомпонентные связи неординарного вида, каждое из которых представляет собой сумму двух дробей. В этих дробях числитель и знаменатель являются термодинамическими коэффициентами одной и той же природы. В дополнение к этому получены однокомпонентные соотношения нетривиального характера, подтверждающие выводы авторов, выраженные в более ранних статьях.

В академической литературе [1-12] наглядно продемонстрировано, что задача определения сравнительно простых, но при этом нетривиальных связей между термодинамическими коэффициентами одинаковой либо различной природы наиболее эффективно решается с применением исчисления якобианов, используемых как в сжатой, так и в развернутой форме [6-12].

С точки зрения физических принципов общепризнано: дилатометрия описывает механические свойства среды путем определения изменения таких параметров, как давление P и объем V. Калориметрия, в свою очередь, устанавливает связи между тепловыми физическими величинами. Другими словами, калориметрия определяет зависимость энтропии от других термодинамических переменных [6-12].

Авторы основное внимание уделили преобразованию дилатометрических коэффициентов. Между тем в результате расчетов проявилась связь таких величин с калорическими параметрами, включая те, которые почти не упоминаются в академической литературе.

Термодинамика, как правило, оперирует четырьмя переменными (P,V,S,T) и их взаимозависимостями [1-12].

Соотношения, вытекающие из преобразования разностей термодинамических коэффициентов. Согласно работам авторов [6-12], после нетривиальных преобразований был получен достаточно объемный комплекс нормированных на единицу двухкомпонентных соотношений, приведенный ниже. Это равенства трех категорий: содержащие только дилатометрические величины, содержащие только калорические величины и содержащие величины обоих типов.

Уравнения для дилатометрических величин имеют вид:

$$1=\frac{\alpha_P}{\alpha_S}+\frac{K_S}{K_T}=\frac{\alpha_S}{\alpha_P}+\frac{\beta_S}{\beta_V}=\frac{K_T}{K_S}+\frac{\beta_V}{\beta_S}.$$

Уравнения для калориметрических величин представляются в такой форме:

$$1=\frac{C_V}{C_P}+\frac{l_T^{(P)}}{m_P^{(T)}}=\frac{C_P}{C_V}+\frac{l_T^{(V)}}{m_V^{(T)}}=\frac{m_P^{(T)}}{l_T^{(P)}}+\frac{m_V^{(T)}}{l_T^{(V)}}$$

Наконец, уравнения смешанного типа имеют вид

$$1=\frac{C_V}{C_P}+\frac{\beta_V}{\beta_S}=\frac{C_P}{C_V}+\frac{\alpha_P}{\alpha_S}=\frac{K_T}{K_S}+\frac{l_T^{(P)}}{m_P^{(T)}}=\frac{K_S}{K_T}+\frac{l_T^{(V)}}{m_V^{(T)}}=\frac{\alpha_S}{\alpha_P}+\frac{m_P^{(T)}}{l_T^{(P)}}=\frac{\beta_S}{\beta_V}+\frac{m_V^{(T)}}{l_T^{(V)}}$$

Замечания. Полученные в работе нормированные на единицу уравнения приводят нас к заключению о некотором самоподобии равенств, содержащих два слагаемых, каждое из которых является отношением величин одной природы. Можно думать, что это является отражением некоего существующего в природе общего принципа построения таких соотношений.

Следует отметить, что «прямой» путь доказательства двухкомпонентных нормированных на единицу равенств, примененный авторами, является нетривиальным. При этом очевидно, что должен существовать также и «обратный» путь, который авторы пока не использовали.

Некогда П. Дирак сказал: «Физические законы должны обладать математической красотой». Следование этому принципу позволяет нам не просто доверять полученным результатам, но и искать в них смыслы более глубокие, чем можно заметить с первого взгляда.

Особо подчеркнем, что нестандартные комбинации, составленные из равных единице дробей, в которых сами дроби состоят из величин как одинаковой, так и различной физической природы, наводят на мысль о существовании некоего физического принципа, который в рамках термодинамики отражен математически. Скорее всего, этот принцип выходит за рамки термодинамики. Несомненно, подобный результат требует более глубокого осмысления.

Выводы. Получены соотношения особого типа, составленные из дробей, включающих в себя термодинамические коэффициенты одной природы. Они представляют собой сумму двух слагаемых, равную единице. Такие равенства имеют определенные особенности, требующие дальнейшего осмысления.

Список литературы

1. Базаров И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – М.: Высшая школа. – 1991. – 376 с.
2. Румер Ю. Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика / Ю. Б. Румер, М. Ш. Рывкин. – М.: Наука. – 1972. – 400 с.
3. Ландау Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука. – 1964. – 568 с.
4. Толпыго К. Б. Термодинамика и статистическая физика / К. Б. Толпыго – Киев: Изд-во Киевского ун-та. – 1966. – 364 с.
5. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления / Г. Стенли. – М.: Мир. – 1973. – 419 с.
6. Червинский Д. А. Нетрадиционные соотношения между полным набором термодинамических коэффициентов, полученных исходя из их прямого определения / Д. А. Червинский, А. В. Христов, В. В. Шелест // Физика и техника высоких давлений. – 2024. – № 1. – С. 55-76.
7. Христов А. В. Соотношения между термодинамическими коэффициентами, полученными с использованием развернутой формы якобианов / А. В. Христов, Д. А. Червинский, В. В. Шелест // Физика и техника высоких давлений. – 2025. – № 4. – С. 53-68.
8. Червинский Д. А. Нетрадиционные соотношения между термодинамическими коэффициентами / Д. А. Червинский, А. В. Христов, В. В. Шелест // Сборник статей V Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и практические решения в науке». – Москва, РФ, 28 февраля 2025 года. – С. 15-27.
9. Червинский Д. А. Особые случаи нестандартной связи между калорическими термодинамическими коэффициентами / Д. А. Червинский, В. В. Шелест // Международная научная конференция «Современная химическая физика – на стыке физики, химии и биологии», Черноголовка, РФ, 15-18 июня 2026 года. – С. 187-188.
10. Христов А. В. Нетривиальные соотношения между термодинамическими коэффициентами, полученные с использованием развернутой формы якобианов. Часть 4 / А. В. Христов, Д. А. Червинский, В. В. Шелест // Физика и техника высоких давлений. – 2026. – № 2. – С. 52-76.
11. Червинский Д. А. Особые соотношения, связывающие термодинамические коэффициенты разной физической природы / Д. А. Червинский, В. В. Шелест // Актуальные вопросы современной науки: сборник статей XXX Международной научно-практической конференции (Пенза, 25 июля 2026 г.). – Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2026. – С. 11-21.

12. Червинский Д. А. Особые нетривиальные уравнения, связывающие термодинамические коэффициенты дилатометрического и калориметрического типа. Часть 1 / Д. А. Червинский, В. В. Шелест // Физика и техника высоких давлений. – 2026. – Т. 36, №3 (в печати).

УДК 539.234; 621.315.592.9

КОНТАКТНЫЕ ПЕРЕХОДЫ «МЕТАЛЛ-УГЛЕРОДНАЯ ПЛЕНКА» С ВАРИСТОРНЫМ ЭФФЕКТОМ

Шалаев Р.В., канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0003-1258-2434,
Изотов А.И., Глазунова В.А., ORCID 0009-0009-8804-2136,
Яковец А.А., ORCID 0009-0008-9861-4399
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
sharos@donfti.ru

Введение. Как известно, варисторный эффект, имеющий свойства схожие с работой массива последовательно и параллельно включенных p-n-переходов, обусловлен наличием гранулированной структуры материала, где ключевое значение имеют размеры гранул, обычно составляющие десятки микрон. Использование наноструктурных углеродных материалов, которые обладают, кстати, немалым потенциалом использования в современной электронике [1], в качестве рабочего вещества варисторов привносит новые возможности в разработку варисторных устройств. Известны работы [2] по исследованию варисторного эффекта в тонких поликристаллических алмазных пленках, с размером мозаичной структуры не превышающем единицы микрометров. В данной работе приведены результаты структурных и резистометрических исследований контактных переходов «металл-углеродная плёнка», демонстрирующих наличие симметричных нелинейных вольт-амперных характеристик (ВАХ), типичных для варисторного эффекта.

Методика. Образцы получались методом магнетронного распыления графита в атмосфере аргона. Углеродные пленки осаждались на подложки из различных материалов (стекло, титан, сталь и др.). Плазма генерировалась с помощью планарного магнетрона постоянного тока с плоским катодом и кольцевым анодом. Условия осаждения образцов были следующими: ток магнетрона 40 мА, температура подложки 350ºС, давление газа в камере 150 мТорр, время роста пленки 40 мин.

Микроструктуру полученных углеродных пленок анализировали методами сканирующей (SEM) и просвечивающей (TEM) электронной микроскопии. Измерение вольт-амперных характеристик является основным методом изучения варисторного эффекта. Электрические

свойства полученных образцов изучались резистометрическим методом при нормальных условиях. Проводимость и ВАХ измерялись в диапазоне напряжений от -5 В до +5 В на контактном переходе в структуре «металлическая подложка – углеродная пленка – измерительный контакт».

Обсуждение. Как было показано ранее [3], в процессе зародышеобразования при газофазном росте углеродных пленок наблюдается кластерный характер напыления углерода. На поверхность подложки осаждаются уже сформированные в плазме кластеры углерода нанометрового размера, из которых в дальнейшем образуются определенные углеродные наноструктуры. Данные просвечивающей электронной микроскопии демонстрируют глобулярную структуру углеродной пленки (рис. 1), с характерными размерами глобул в десятки/сотни нанометров. Мелкие глобулы имеют тенденцию объединяться в более крупные глобулярные образования с размером ~200 нм.

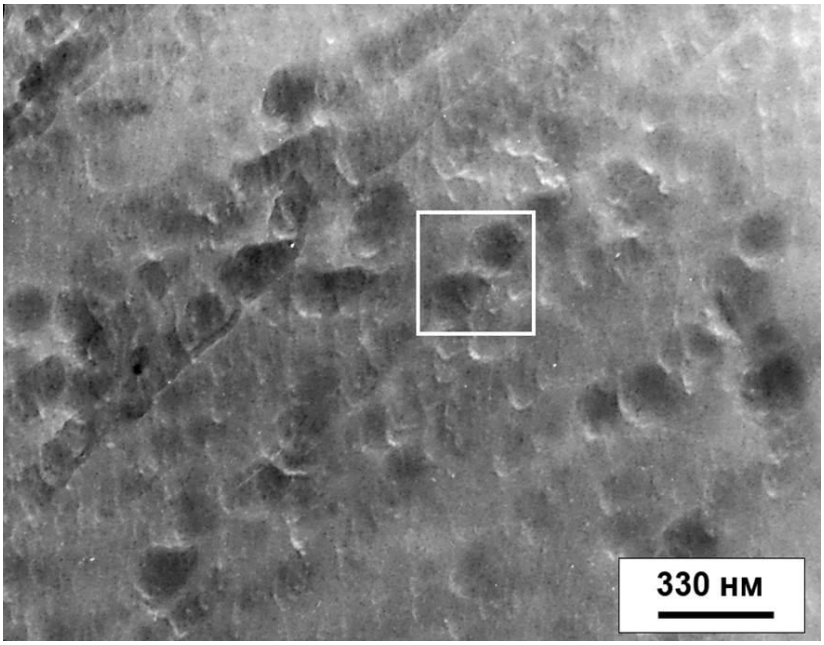
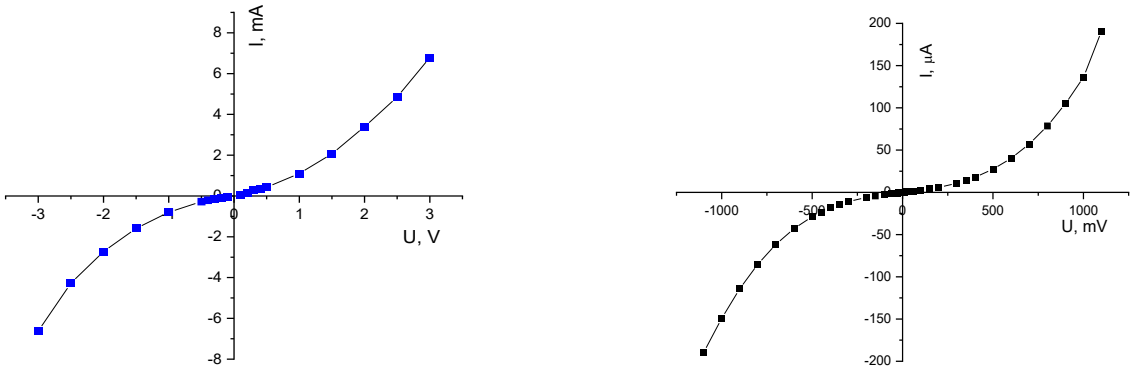


Рис. 1. ТЕМ-изображение глобулярной структуры углеродной пленки

На рис. 2 показаны ВАХ контактов «сталь-углеродная пленка» и «титан-углеродная пленка» при нормальных условиях. Видно, что ВАХ имеют симметричную нелинейную зависимость, характерную для омического контакта с отсутствующим потенциальным барьером. Такая зависимость указывает на наличие варисторного эффекта в полученных образцах при весьма низких напряжениях. Оцененное классификационное напряжение (при токе 1 мА через образец) составляет всего лишь ~1 В для контакта «сталь-углеродная пленка» и ~1.5 В для контакта «титан-углеродная пленка». Оцененные низкие характерные значения классификационного напряжения можно объяснить сравнительно небольшими размерами углеродных глобул, составляющими доли

микрометра и, соответственно, достаточно большим начальным количеством проводящих каналов между этими углеродными частицами.



а) б)

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики контакта «сталь-углеродная пленка» (а) и контакта «титан-углеродная пленка» (б)

Также важным параметром варисторов является коэффициент нелинейности, определяемый как отношение статического сопротивления к динамическому сопротивлению в одной и той же точке ВАХ. Коэффициенты нелинейности λ ВАХ полученных контактных переходов «сталь-углеродная пленка» и «титан-углеродная пленка» относительно малы по сравнению с классическими варисторными материалами и составляют ~2 и 3, соответственно.

Заключение. В результате проведенных исследований были обнаружены нелинейные симметричные участки вольт-амперных характеристик образцов контактных переходов «металл-наноуглеродная пленка». Такие ВАХ типичны для варисторного эффекта с оцененным значением классификационного напряжения 1…2 В и малым коэффициентом нелинейности. Мы предполагаем, что варисторный эффект обусловлен глобулярной структурой углеродных пленок, в которой электрическая проводимость определяется контактными проводящими каналами между углеродными наночастицами.

Список литературы

1. Шалаев, Р. В. Использование материалов на основе углерода в современной микро- и наноэлектронике. Обзор / Р. В. Шалаев, А. И. Изотов // ФТВД. – 2025. – Т. 35, № 1. – С. 5-21.
2. Самсоненко, С. Н. Варисторный эффект в поликристаллических алмазных пленках / С. Н. Самсоненко // ФТВД. – 2025. – Т. 35, № 2. – С. 34-40.
3. Мохненко, М. И. Низкотемпературный синтез и структура гибридных наноматериалов Ni@C, полученных методом реактивного магнетронного распыления / М. И. Мохненко, В. Н. Варюхин, А. М. Прудников и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37, №6. – С. 741-750. – DOI 10.15407/mfint.37.06.0741.

УДК 538.221

СТАЦИОНАРНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ В СЛАБЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Шитов А.А., канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0000-0001-9685-8850
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» –
филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ
a.a.shitov@donnasa.ru

Возможность управления доменной структурой в электрическом поле экспериментально наблюдалась в [1]. Неоднородное электрическое поле создавалось электродом – заостренной медной проволокой, которая касалась поверхности эпитаксиальных пленок ферритов. Положительный относительно подложки пленки потенциал на игле электрода вызывает притяжение доменной границы (ДГ) к электроду, а отрицательный – отталкивание. Авторы работы [2] связывали наблюдаемые в [1] эффекты с тем, что неоднородное электрическое поле на конце электрода приводит к локальному изменению магнитной анизотропии материала и, как следствие, к перемещению доменной границы.

В настоящей работе теоретически исследуются структуры магнитных ДГ в переменном электрическом поле. В качестве объекта исследования рассматривается слабый ферромагнетик (СФМ) с анизотропией типа «легкая ось». В СФМ типа редкоземельных ортоферритов (РЗО) вдали от области спиновой переориентации, в отсутствии внешних полей возможны три типа магнитного упорядочения: G_xF_z, G_zF_x и G_y [3]. Структуры G_xF_z и G_zF_x обладают слабым ферромагнетизмом, а G_y – характерно для чистого антиферромагнетика.

Рассмотрена бесконечная пластина РЗО с характерной симметрией $2_x^-2_z^-$ (декартовы оси X, Y, Z совпадают с a, b, c осями кристалла). Энергия СФМ ромбической симметрии записана в терминах единичного вектора антиферромагнетизма [4]. Энергия учитывает обменное взаимодействие, магнитную анизотропию, взаимодействие Дзялошинского. Взаимодействие с электрическим полем описывается энергией с квадратичным магнитоэлектрическим взаимодействием. Электрическое поле считается однородным в пространстве и переменным во времени. Из условия минимума энергии СФМ получены уравнения, описывающие распределение намагниченности. Рассматривается быстро осциллирующее электрическое поле с частотой много большей релаксационной. Уравнения, описывающие распределение намагниченности, усреднены по периоду колебаний переменного электрического поля.

Переменное электрическое поле приводит к перенормировке констант анизотропии (что аналогично [2]) и появлению дополнительных

слагаемых в уравнениях, описывающих стационарные распределения намагниченности. Эти дополнительные слагаемые пропорциональны квадрату электрического поля $E_i E_j$ ($i \neq j$ и $i, j = x, y, z$ – в зависимости от того, какое магнитное состояние рассматривается). Найдены решения этих уравнений, которые описывают стационарные распределения намагниченности для всех трех магнитных состояний $G_x F_z$, $G_z F_x$ и G_y. Эти решения выражаются через эллиптические интегралы первого рода. Показано, что относительный сдвиг такого скрещенного поля $E_i E_j$ по фазе ϕ не может быть произвольным: $\cos\phi > 0$, в противном случае магнитная конфигурация становится неустойчивой. Установлено, что переменное электрическое поле подмагничивает подрешетки магнетика таким образом, что векторы антиферромагнетизма в соседних доменах перестают быть коллинеарными: ДГ перестает быть 180-градусной. Например, для иттриевого ортоферрита с магнитной конфигурацией $G_x F_z$ реализуются стационарные распределения, близкие к ДГ **ab**- и **ac**-типа. При амплитуде электрического поля $E_0 = 25$ ед.СГСЕ, ДГ становится 178-градусной.

При изменении амплитуды электрического поля возможна перестройка доменной структуры. Нами определены возможные варианты перестройки под действием переменного электрического поля: с переориентацией ДГ и без переориентации.

Аналогичные эффекты могут наблюдаться и при наличии постоянного электрического поля.

Список литературы

1. Logginov A. S. Room temperature magnetoelectric control of micromagnetic structure in iron garnet films / A. S. Logginov, G. A. Meshkov, A. V. Nikolaev [et al.] // Applied Physics Letters. – 2008. – V. 86. – P. 182510. – DOI: 10.1063/1.3013569. – EDN: LLNFJF.
2. Арзамасцева Г. В. Свойства обладающих магнитоэлектрическим эффектом эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов с (210)-ориентацией / Г. В. Арзамасцева, А. М. Балбашов, Ф. В. Лисовский и др. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 147, № 4. – С. 793-810. – EDN: TWPUNF.
3. Фарзтдинов М. М. Физика магнитных доменов в антиферромагнетиках и ферритах / М. М. Фарзтдинов. – Москва: Наука, 1981. – 155 с.
4. Gerasimchuk V. S. Induced motion of domain walls in multiferroics with quadratic interaction / V. S. Gerasimchuk, A. A. Shitov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013. – V. 344. – P. 124–128. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.05.046.

УДК 544.16

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА И СЛАБОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ДРЕВЕСНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Ющенко Е.В., канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4827-2756,
Фёклин В.Н., канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0009-0002-3274-1850,
Жеребцов А.С.
ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
katerina.vgltu@yandex.ru, vfekl3@mail.ru

Введение. Современные технологии получения древесных полимерных композиционных материалов (ДПКМ) предъявляют повышенные требования к однородности структуры композита, прочности межфазных связей и стабильности эксплуатационных характеристик композитов вследствие роста требований к качеству материалов и усиления конкуренции на рынке [1]. Ключевым фактором, определяющим качество ДПКМ, является эффективность взаимодействия компонентов на границе раздела фаз «древесина–полимерная матрица». Традиционные технологические подходы зачастую не обеспечивают равномерного распределения модификаторов по матрице и необходимой полноты протекания межфазных процессов [2]. Это обусловливает наличие локальных дефектов, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные характеристики материала и ограничивающих области его применения.

Цель данной работы: анализ потенциала применения физических полей в технологии ДПКМ.

Основная часть. Одним из перспективных направлений интенсификации технологии в деревообработке является применение внешних физических полей, в частности ультразвукового (УЗ) и слабого импульсного электромагнитного (СИЭМП), позволяющих целенаправленно управлять структурообразованием композита на микро- и мезоуровне [3].

С физической точки зрения, процессы, инициируемые УЗ и СИЭМП, включают в себя нелинейные явления в гетерогенных средах, перераспределение энергии в системах «смола-модификатор», «связующее-древесный наполнитель» и изменение кинетики химических взаимодействий компонентов ДПКМ. УЗ-волны в клеевых средах вызывают кавитацию и акустические течения: локальные микропузырьки при схлопывании генерируют ударные волны и высокие локальные температуры/давления. Что способствует равномерному распределению модификатора в полимерных матрицах, улучшает смачивание, ускоряет диффузию компонентов клея в поры древесины [4]. Совокупность указанных факторов обусловливает улучшение морфологических свойств ДПКМ. Древесина

является анизотропным диэлектриком с выраженной волокнистой структурой. СИЭМП индуцирует токи смещения и поляризацию, что влияет на подвижность ионов в капиллярах и на ориентацию полярных групп в смоле. Следствием прессования ДПКМ является деформация материала, негативно влияющая на прочность материала. СИЭМП может увеличивать твердость древесины, что обусловливается образованием новых ковалентных связей типа С-О-С между боковыми группами макромолекул целлюлозы. С другой стороны, эффективность применения СИЭМП заключается в повышении прочности клеевых соединений композита, это аргументируется получением более упорядоченной структуры, связанной с ориентацией звеньев молекулярной цепи системы «смола-древесина» [5].

Заключение. Таким образом, совместное применение УЗ и СИЭМП в технологии позволяет эффективно управлять качеством межфазных границ в ДПКМ. В совокупности воздействие физических полей способствует росту плотности сшивки полимера и адгезионной прочности композита. Практическая значимость исследования заключается в возможности внедрения рассмотренных методов обработки связующего и композита в актуальные технологии ДПКМ для улучшения эксплуатационных показателей материала и повышения качества продукции.

Список литературы

1. Xue, D. Mechanical properties, thermal stability, and formaldehyde emission analysis of nanocellulose-reinforced urea–formaldehyde resin and its mechanism / D. Xue, L. Zhu, W. Zhongwei [et al.] // Polymers (Basel). – 2025. – V. 17 (10). – P. 1402. – DOI: https://doi.org/10.3390/polym17101402.
2. Шамаев, В. А. Повышение прочности склеивания шпона в технологии фанеры / В. А. Шамаев, Е. М. Разиньков, Т. Л. Ищенко // Древесные плиты и фанера теория и практика: материалы XXIV Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 17–18 марта 2021 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова. – Санкт-Петербург: Политех-пресс. – 2021. – С. 117-120.
3. Ющенко, Е. В. Синергический эффект при обработке связующего и фанеры в технологии производства фанеры повышенной прочности и экологичности / Е. В. Ющенко, Л. И. Бельчинская // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2025. – № 68. – С. 305-308. – EDN SDUYIR.
4. Farsi, M. Effects of Functionalized Multi-walled Carbon Nanotubes on the Performance of Wood–Plastic Composites / M. Farsi, F. Maashi Sani, M. Ebadi [et al.] // Fibers Polym/ – 2024. – V. 25. – P. 309–316. – https://doi.org/10.1007/s12221-023-00388-1.
5. Камалова, Н. С. Влияние слабых импульсных магнитных полей на механические и адсорбционные свойства модифицированной древесины: специальность 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»: Автореферат на соискание кандидата технических наук / Н. С. Камалова; ГОУВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия». – Воронеж, 2008. – 16 с.

УДК 669.3:539.89

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ГИДРОЭКСТРУЗИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕДИ

Яшарова Е.В., ORCID 0009-0002-8780-0918,
Сенникова Л.Ф., ORCID 0000-0002-6021-2318,
Суровицкий В.Д., ORCID 0009-0009-0722-4035
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
yasharova.liza@yandex.ru

Введение. Медь широко применяется в электротехнике, машиностроении и теплоэнергетике благодаря высокой электро- и теплопроводности, коррозионной стойкости и технологичности. Однако низкая прочность меди в исходном состоянии (σ_b = 220 – 250 МПа) ограничивает её использование в изделиях, испытывающих механические нагрузки [1]. Для упрочнения меди применяют методы интенсивной пластической деформации (ИПД), основанные на деформации простого сдвига, например, равноканальное угловое прессование, позволяющие накапливать высокий уровень деформаций и повышать уровень прочности меди свыше 400 МПа [2, 3]. Однако методы ИПД являются преимущественно упрочняющими и могут применяться лишь для создания полуфабрикатов будущих изделий в виде наноструктурированных заготовок [4]. В отличие от них, гидроэкструзия (ГЭ) относится к упрочняюще-формообразующим методам и позволяет получать готовые профили, трубы и проволоку с повышенными механическими свойствами. Вместе с тем для деформации экструзией требуется в 2–3 раза большее давление, чем для простого сдвига [5], что при высоких степенях обжатия может приводить к снижению упрочняющего эффекта из-за разогрева от работы деформации [6]. В связи с этим актуальной задачей является определение максимально допустимой величины деформации при гидроэкструзии меди до начала её разупрочнения.

Цель данной работы заключается в определении рационального режима обработки гидроэкструзией меди, при котором достигается наибольшее упрочнение.

Основная часть. В качестве исследуемого материала была выбрана бескислородная медь марки М0б после вакуумного отжига при температуре 600°С с выдержкой 2 часа. Заготовки с различным диаметром (D_0 = 12,8 – 20 мм) обрабатывались гидроэкструзией при комнатной температуре с использованием пресса силой 100 т на установке с рабочим диаметром контейнера 22 мм и диаметром выходного отверстия конической матрицы D_1 = 11 мм. Величина деформации ГЭ варьировалась от 0,3 до 1,2 с шагом в 0,3 и определялась по известному соотношению [7]:

$$e = \ln\left(\frac{D_0^2}{D_1^2}\right).$$

Оценку адиабатического разогрева заготовок от деформации при ГЭ проводили по соотношению [6]:

$$\Delta T = \frac{\beta p}{\rho c_p},$$

где ρ – плотность материала, c_p – удельная теплоемкость, p – давление экструзии в стабильной стадии процесса, а $\beta = 0{,}95$ – безразмерный параметр, характеризующий долю работы деформации, переходящей в тепло.

На рисунке представлено влияние давления ГЭ на температуру адиабатического разогрева заготовок с учетом исходной температуры (T_0=20°C) при различной степени деформации. На кривой указаны границы зоны запуска релаксационных процессов в зависимости от состояния меди: для меди после отжига сплошной линией, а для сильно деформированной – пунктирной. Учитывая, что с увеличением степени деформации происходит понижение температуры начала рекристаллизации, исходя из данных на кривой можно предположить, что при степени деформации ГЭ выше $e = 0{,}9$ в меди уже могут начаться процессы разупрочнения.

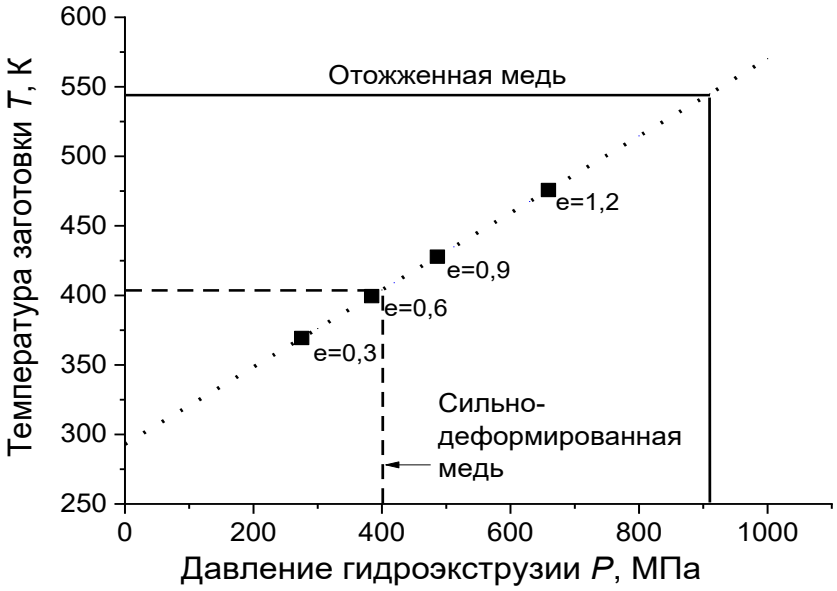


Рис. Влияние давления ГЭ на температуру заготовок при различной степени деформации

Прочность и пластичность меди оценивали испытаниями на растяжение по ГОСТ 1497-84. Предел прочности меди в исходном состоянии составил $\sigma_b = 242 \pm 4$ МПа, а с применением ГЭ активно возрастает до деформации $e = 0{,}9$ достигая значения $\sigma_b = 422 \pm 5$ МПа. С

увеличением деформации до $e = 1{,}2$ повышение прочности в значительной мере замедляется, прочность достигает максимальной в данном исследовании величины $\sigma_b = 431 \pm 10$ МПа. Относительное удлинение меди при обработке ГЭ падает с исходного значения $\delta = 47{,}1 \pm 0{,}5$ % до минимального $\delta = 16{,}5 \pm 0{,}3$ % при $e = 0{,}9$ и при $e = 1{,}2$ незначительно возрастает до $\delta = 18{,}3 \pm 0{,}7$ %. Значительное замедление упрочнения и повышение относительного удлинения при $e = 1{,}2$ свидетельствует о запуске релаксационных процессов в меди и хорошо согласуется с выводом, сделанным по рис.

Заключение. По результатам исследования было определено, что обработка меди гидроэкструзией со степенью деформации в диапазоне $e = 0{,}9 – 1{,}2$ позволяет упрочнить медь до $\sigma_b = 420 – 430$ МПа. Также установлено, что деформации ГЭ величиной $e = 1{,}2$ достаточно для инициации релаксационных процессов вследствие деформационного разогрева.

Информация о финансовой поддержке: *Исследования проводились в рамках государственного задания FREZ-2024-0001.*

Список литературы

1. Gorsse S. Dataset of mechanical properties and electrical conductivity of copper-based alloys / S. Gorsse, M. Gouné, W. Ch. Lin [et al.] // Scientific Data. – 2023. – Vol. 10, No. 1. – P. 504. – DOI 10.1038/s41597-023-02411-9. – EDN QXIDWG.
2. Сенникова Л. Ф. Влияние гидроэкструзии на структуру и механические свойства меди М0б, предварительно обработанной равноканальным угловым прессованием / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, В. М. Ткаченко [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2025. – № 3(123). – С. 31-37. – DOI 10.22349/1994-6716-2025-123-3-31-37. – EDN ERNAHS.
3. Яшарова Е. Повышение сдвигового напряжения разрушения субмикрокристаллической меди методом гидроэкструзии / Е. Яшарова, А. Гангало, В. Суровицкий и др. // Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedenia. – 2026. – No. 1(23). – P. 124-132. – DOI 10.25712/astu.1811-1416.2026.01.013. – EDN: PTKMJE.
4. Volokitin A. V. Severe Plastic Deformation Methods Influence on the Structure and Properties of Metal Materials: A Review / A. V. Volokitin, I. E. Volokitina, A. I. Denissova [et al.] // Johnson Matthey Technology Review. – 2025. – Vol. 69, No. 2. – P. 198–213. – DOI 10.1595/205651325X17343556140949. – EDN: TMWOOJ.
5. Сегал В. М. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 230 с.
6. Iasharova E. V. Relaxation of the Strength Properties of Ultrafine-Grained Copper during Hydrostatic Extrusion / E. V. Iasharova, A. N. Gangalo, S. V. Vasiliev [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2026. – Vol. 90, No. 8. – P. 1334-1339. – DOI 10.1134/S106287382670111X. – EDN: NKXGZX.
7. Гангало А. Н. Влияние гидропрессования на механические свойства ультрамелкозернистой меди / А. Н. Гангало, Е. В. Яшарова, Л. Ф. Сенникова [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2025. – № 10. – С. 19-27. – DOI 10.31044/1814-4632-2025-10-19-27. – EDN SGFZQV.

Радиофизика, инфокоммуникационные технологии, информационная безопасность

УДК 004.7:621.396

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ РАДИООТПЕЧАТКОВ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

Ахметгалеев И.А., Тутубалин П.И., канд. техн. наук, доц.
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
islamikakhmetgaleev@gmail.com

Введение. Определение местоположения людей и объектов внутри зданий является актуальной задачей современных информационных систем. Из-за ослабления и искажения спутниковых сигналов в помещениях применяются специализированные технологии позиционирования.

Одним из доступных подходов является метод радиоотпечатков, основанный на сравнении параметров радиосигналов в текущей точке с заранее сформированной базой эталонных измерений [1, 2].

Дополнительное значение имеют вопросы надёжности и безопасности автоматизированных систем, включая методы оценки и обеспечения информационной безопасности.

Основная часть. В помещении размещаются радиопередатчики: точки доступа беспроводной локальной сети, Bluetooth-маяки или специализированные якоря. Параметры принимаемых сигналов изменяются в зависимости от положения измерительного устройства.

Пусть помещение разбито на множество контрольных точек:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}, \quad (1)$$

где p_i – координаты -й контрольной точки.

Если в зоне наблюдения находятся M радиопередатчиков, радиоотпечаток в точке p_i представляется вектором:

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iM}), \quad (2)$$

где r_{ij} – значение измеряемого параметра сигнала от -го передатчика.

Эталонная база радиоотпечатков имеет вид:

$$F = \{(r_i, p_i)\}_{i=1}^{N}. \quad (3)$$

Таким образом, функционирование системы можно разделить на два основных этапа:

1) предварительное обследование помещения и построение эталонной базы;

2) измерение текущего радиоотпечатка и определение положения объекта.

Алгоритмы сопоставления радиоотпечатков. Наиболее простым методом является **(k)-ближайших соседей (k-NN)**. Текущий радиоотпечаток сравнивается с эталонными, после чего выбираются наиболее близкие точки. Координаты определяются по их положению. Метод отличается простотой, но чувствителен к шумам и требует хранения базы измерений.

Вероятностные методы позволяют учитывать статистическое распределение радиосигналов и априорную информацию о положении объекта [3, 4]. При этом вероятностные характеристики могут использоваться и при оценке безопасности автоматизированных систем [6].

Методы машинного обучения позволяют учитывать нелинейную зависимость между параметрами сигналов и положением объекта. Для этой задачи могут использоваться метод опорных векторов, случайный лес и регрессионные модели [4]. Более сложным вариантом являются нейронные сети, однако их применение требует большего объёма обучающих данных.

При выборе конкретного решения необходимо учитывать не только точность, но и стоимость инфраструктуры, сложность обработки данных, устойчивость к изменениям радиоокружения и требования информационной безопасности.

Сравнительный анализ методов. В таблице приведено сравнение основных технологий позиционирования внутри помещений, включая беспроводные локальные сети, Bluetooth, сверхширокополосную связь, радиочастотную идентификацию и магнитное поле [1, 4, 5].

Таблица

Сравнение технологий позиционирования внутри помещений

Технология	Ориентировочная точность	Стоимость	Преимущества	Ограничения
Беспроводные локальные сети	2–8 м	Низкая	Использование существующей инфраструктуры	Изменчивость уровня сигнала
Bluetooth с низким энергопотреблением	1–5 м	Средняя	Компактные и экономичные маяки	Требуется обслуживание маяков
Сверхширокополосная связь	0,1–0,5 м	Высокая	Высокая точность	Специализированная инфраструктура
Радиочастотная идентификация	От десятков сантиметров до нескольких метров	Средняя	Эффективность для складов	Ограниченная зона обнаружения
Магнитное поле	1–5 м	Низкая	Использование магнитометра	Зависимость от конструкции здания
Комбинированные методы	1–3 м	Средняя	Повышенная устойчивость	Более сложная обработка

При проектировании подобных систем необходимо учитывать и требования информационной безопасности. Использование автоматизированных систем обработки данных требует контроля защищённости

программных компонентов и применяемых механизмов защиты [6]. При передаче и хранении чувствительных данных могут возникать задачи криптографической защиты, для оценки которой применяются методы анализа стойкости асимметричных алгоритмов [7].

Информация о финансовой поддержке: *Научные результаты, изложенные в данной статье, были получены в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075-15-2026-055 от «06» апреля 2026 г.).*

Список литературы

1. Miralles I. From Fingerprinting to Advanced Machine Learning: A Systematic Review of Wi-Fi and BLE-Based Indoor Positioning Systems / I. Miralles, J. Torres-Sospedra et al. // Sensors. – 2025. – Vol. 25, No. 22. – Art. 6946.
2. Shang S. Overview of WiFi fingerprinting-based indoor positioning / S. Shang, L. Wang // IET Communications. – 2022. – Vol. 16, No. 7. – P. 725–733.
3. Dai J. A Survey of Latest Wi-Fi Assisted Indoor Positioning on Different Principles / J. Dai, M. Wang, B. Wu [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 18. – Art. 7961.
4. Bellavista-Parent V. Comprehensive Analysis of Applied Machine Learning in Indoor Positioning Based on Wi-Fi: An Extended Systematic Review / V. Bellavista-Parent, J. Torres-Sospedra, A. Pérez-Navarro // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 12. – Art. 4622.
5. Casha O. A Comparative Analysis and Review of Indoor Positioning Systems and Technologies / O. Casha // Innovation in Indoor Positioning Systems. – 2024. – P. 1–26.
6. Моисеев, В. С. К задаче определения вероятностных характеристик информационной безопасности разрабатываемых автоматизированных систем управления / В. С. Моисеев, П. И. Тутубалин. – Деп. рук. в ВИНИТИ 11.01.2007, № 26-В2007.
7. Тутубалин, П. И. Оценка криптографической стойкости ассиметричных алгоритмов шифрования RSA и ГОСТ р 34.10-2001 / П. И. Тутубалин // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Тольятти, 20–21 апреля 2017 года. В 4 т. – Т. 1. – Тольятти: Волжский университет имени В.Н. Татищева (институт), 2017. – С. 45–56.

УДК 004.056.53

ФОРМАТНАЯ СТРОКА КАК ВЕКТОР АТАКИ В ЯЗЫКАХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ

Бабичева М.В., канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1353-5923
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
m.babicheva@donnu.ru,

Введение. В языках высокого уровня (Python, PHP, Java, Golang) классическая атака, связанная с перезаписью памяти через %n, невозможна или значительно ограничена. Это связано с тем, что в Python и Java отсутствует прямой доступ к памяти, в PHP спецификатор %n удалён начиная с версии 8.0, в Golang спецификатор %n не поддерживается намеренно, чтобы предотвратить низкоуровневые атаки.

Однако, информационные утечки через форматные строки все еще возможны. Кроме того, комбинирование форматных строк с другими векторами атак (SQL-инъекции, обход аутентификации, включение файлов) остаётся малоизученной областью, особенно в контексте Golang и Java.

Цель. Многие разработчики до сих пор недооценивают опасность передачи недоверенных данных в первый аргумент printf, String.format или fmt.Sprintf. Анализаторы кода не всегда способны выявить такие дефекты, особенно когда форматная строка формируется динамически из нескольких источников. В то же время современные образовательные программы по кибербезопасности уделяют недостаточно внимания этому классу уязвимостей применительно к высокоуровневым языкам, фокусируясь в основном на классических примерах из C. Данная работа направлена на восполнение этого пробела. Целью работы является разработка заданий, решение которых поможет студентам лучше понять суть такого вида уязвимостей

Результаты экспериментов. В ходе работы изучены принципы работы функций форматированного вывода в четырех языках программирования высокого уровня, проанализированы причины появления уязвимостей. Проведена практическая демонстрация уязвимостей, способов их устранения и способов обхода защит. Показано, что в языках высокого уровня атака трансформируется в информационную утечку или инъекции, но не даёт прямого выполнения кода (за исключением Log4Shell, который является отдельной уязвимостью библиотеки). Для экспериментального исследования было разработано 11 приложений на четырех языках высокого уровня, которые имели уязвимости форматного вывода. Все они представляют из себя задания-тренажеры, в которых необходимо найти секреты, спрятанные в серверных переменных, переменных окружения и переменных в исходном коде.

Результаты проведения тестовых атак представлены в таблице.

Таблица

Результаты исследования уязвимости форматной строки
в различных языках высокого уровня

Язык программирования	Описание атаки	Результат	Выводы
Python	Эксплуатация .format() через GET-параметр ?format={0}	Полный доступ к конфигурации и переменным окружения.	Уязвимость позволяет читать любые данные из переданных аргументов, включая серверные секреты
Python	Фаззинг с payload'ами ({0[config]}, {0[env]}, {0.__init__.__globals__})	Получен полный словарь data, включая config, env, flag_var	Автоматизация поиска уязвимости показывает критичность проблемы

Продолжение таблицы

Python	Доступ к константам функции через {self.__init__.__globals__[secret_function].__code__.co_consts}	Получен секрет из байт-кода функции	Возможен доступ к атрибутам объектов, включая байт-код функций
PHP	Ввод спецификатора %s в GET-параметр	Получен секрет, переданный как второй аргумент printf()	Контроль над форматной строкой делает возможным чтение любых аргументов
PHP	Ввод admin' -- %s в поле логина	Обход аутентификации через SQL-инъекцию	Форматная строка может быть вектором для SQL-инъекций
PHP	Перебор спецификаторов %s, %1$s, %2$s	Получены все серверные переменные (логин, пароль, токен, флаг)	Перебор аргументов позволяет извлечь все секреты
Java	Отправка %0$d в параметр fmt	Выброс IllegalFormatArgumentIndexException. Отказ в обслуживании (DoS)	Некорректный формат вызывает падение потока и DoS
Java	Перебор позиционных спецификаторов %1$s, %2$s, ...	Получен полный дамп всех аргументов	String.format() позволяет читать произвольные аргументы
Java	JNDI-инъекция. Отправка ${jndi:ldap://attacker.com/Exploit}	Log4Shell – RCE через логирование	Log4j интерпретирует lookup-выражения и ведет к выполнению кода
Golang	Ввод %s, %[2]s, %[3]s в параметр fmt	Получены пароль, API-ключ, флаг и все секреты	Go поддерживает %[n]s для чтения n-го аргумента. Уязвимость легко автоматизируется
Golang	SQL через fmt.Sprintf	Получены все записи из таблицы user, секрет из скрытой таблицы	fmt.Sprintf с пользовательским вводом это прямой путь к классической SQL-инъекции

Выводы и рекомендации разработчикам. Уязвимость форматной строки в языках высокого уровня не исчезла, а изменила форму: из инструмента компрометации памяти она превратилась в инструмент разведки и инъекций. Это делает её не менее опасной, особенно в веб-приложениях, где утечка одного токена или пароля может привести к полной компрометации системы. Поэтому валидация ввода пользователя и тестирование приложения с учетом таких уязвимостей должна стать необходимым условием для безопасной разработки.

Результаты исследования могут быть использованы для повышения осведомлённости разработчиков о рисках, связанных с форматными

строками, а также для внедрения более строгих практик безопасного программирования. Разработанные программы и методика будут внедрены в учебный процесс как материал для лекций и лабораторных работ по курсу «Анализ безопасности web-проектов».

Список литературы

1. HackTricks. Go Format String [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: https://book.hacktricks.xyz/reverse-engineering/linux-101/go-format-string свободный.
2. Snyk. Format string vulnerabilities in Python [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://snyk.io/blog/format-string-vulnerabilities-in-python/ свободный.
3. CVE-2021-44228. Apache Log4j2 JNDI Injection Vulnerability [Электронный ресурс]. NIST, 2021. – Режим доступа: URL: https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2021-44228 свободный.

УДК 004.7:621.396

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH LOW ENERGY В СИСТЕМАХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ INDOOR-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ

Багаутдинов А.И., Тутубалин П.И., канд. техн. наук, доц.
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
artemka.bagautdinoff1@yandex.ru

Введение. Определение местоположения объектов одна из базовых задач современных информационных систем. На открытом пространстве ее решают спутниковые системы, однако внутри зданий из-за ослабления и искажения сигнала они не обеспечивают требуемую точность [1].

Для решения этой проблемы развиваются Indoor Positioning Systems (IPS), использующие Wi-Fi, Bluetooth, RFID, UWB, инерциальные датчики и другие источники информации. При этом метода, сочетающего высокую точность, низкую стоимость и простоту развертывания, не существует [1]. Indoor-навигация применяется в торговых центрах, аэропортах, больницах, на предприятиях и складах, где также востребовано отслеживание оборудования, транспорта и сотрудников. BLE удобен из-за низкого энергопотребления и широкого распространения устройств [2].

Первоначально BLE-позиционирование основывалось на оценке расстояния по RSSI. С появлением Bluetooth Core 5.1 технология получила Direction Finding с методами AoA и AoD [3, 4]. Основными подходами сегодня являются RSSI-трилатерация, fingerprinting и определение направления.

Основная часть. RSSI – показатель мощности принятого радиосигнала. В простейшей модели для оценки затухания используется логарифмическая модель (1):

$$RSSI(d) = A - 10n\log_{10}(d)\,, \quad (1)$$

где RSSI(d) – уровень сигнала на расстоянии d; A – значение RSSI на опорном расстоянии; n – коэффициент затухания среды. После преобразования находят оценку расстояния по формуле (2):

$$d = 10^{\frac{A-RSSI(d)}{10n}}, \quad (2)$$

Если известны координаты трех маяков (x_i, y_i) и оценены расстояния до них d_i, положение устройства определяется как решение системы (3):

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2, \quad (3)$$

Геометрически расстояния задают окружности; из-за погрешностей измерений их пересечение заменяется оптимизацией [1, 2]. Поскольку RSSI дает расстояния, корректен термин «трилатерация» (триангуляция использует углы).

Главный недостаток RSSI – нестабильность радиосигнала в помещении. Многолучевое распространение (multipath) сильно ограничивает точность [2, 5]. Для снижения шума применяются скользящее и экспоненциальное среднее, медианный фильтр и частицевый фильтр. Современные исследования выделяют фильтрацию Калмана, машинное и глубокое обучение как основные направления повышения устойчивости BLE-позиционирования [5, 6].

Fingerprinting – метод позиционирования по заранее созданной радиокарте. В оффлайн-фазе в контрольных точках измеряется RSSI от BLE-маяков, формируя «радиоотпечатки». В онлайн-фазе текущие значения RSSI сравниваются с картой.

В отличие от трилатерации, метод учитывает особенности радиосреды и не требует прямой зависимости RSSI от расстояния [1, 2, 5]. Основной недостаток – необходимость трудоемкого обновления радиокарты при изменении мебели, перегородок или расположения маяков.

С появлением Bluetooth Direction Finding в спецификации Bluetooth Core 5.1 BLE получил методы Angle of Arrival (AoA) и Angle of Departure (AoD) [3, 4], использующие специальные пакеты с Constant Tone Extension (CTE) [3, 4]. Они дают информацию о направлении распространения сигнала. В AoA приемник с антенной решеткой оценивает угол прихода по фазовым различиям сигналов [3]. В AoD антенный массив устанавливается на передатчике, а мобильное устройство определяет направление на локатор, формируя инфраструктуру для indoor-навигации [4]. Оценка направления повышает информативность измерений. Несколько локаторов позволяют точнее определять координаты, но требуют сложной антенной инфраструктуры. Субметровый результат возможен в подходящих конфигурациях, однако не гарантируется [5].

Помимо метода определения координат важна архитектура системы. Условно выделяются client-based и server-based positioning. В client-based архитектуре устройство самостоятельно принимает BLE-сигналы и вычисляет координаты. В server-based архитектуре: стационарные приемники собирают сигналы BLE-меток и передают их на сервер для расчета координат. Bluetooth SIG рассматривает Direction Finding как основу для высокоточных RTLS-сценариев [4,5]. Минусы: стационарная инфраструктура, серверная часть и жесткие требования к защите геоданных.

Современные BLE-системы переходят к гибридной навигации: BLE комбинируется с PDR для коррекции накопленной ошибки, с Wi-Fi RTT для оценки расстояния и с UWB для сверхточного позиционирования в критических зонах. Методы глубокого обучения (LSTM, CNN) применяются для обработки зашумленного RSSI и обновления fingerprint-карт [5].

Комплексные системы также требуют учета безопасности и надежности: автоматизации тестирования [6], оценки информационной безопасности [7], обработки изображений [8], интеграции медицинских платформ [9] и стойкости алгоритмов шифрования [10].

Заключение. BLE – доступная и энергоэффективная основа для indoor-позиционирования. RSSI-трилатерация проста, но чувствительна к радиосреде, а fingerprinting требует постоянного обновления радиокарты. Bluetooth Direction Finding, гибридные и ML-методы повышают точность до субметровой, но стабильность требует комплексного использования нескольких источников данных [5, 6].

Информация о финансовой поддержке: *Научные результаты, изложенные в данной статье, были получены в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075-15-2026-055 от «06» апреля 2026 г.).*

Список литературы

1. Mendoza-Silva, G. M. A Meta-Review of Indoor Positioning Systems / G. M. Mendoza-Silva, J. Torres-Sospedra, J. Huerta // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 20. – Art. № 4507.
2. Kriz, P. Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons / P. Kriz, F. Maly, T. Kozel // Mobile Information Systems. – 2016. – Vol. 2016. – Art. № 2083094.
3. Bluetooth Core Specification. Direction Finding // Bluetooth SIG [Электронный ресурс]. – URL: https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-1/ (дата обращения: 20.09.2026).
4. Bluetooth Direction Finding Feature Overview // Bluetooth SIG [Электронный ресурс]. – URL: https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-direction-finding-feature-overview/ (дата обращения: 20.09.2026).
5. Bluetooth low energy for indoor positioning: Challenges, algorithms and datasets / M. Ghaemifar, S. Motie, S. M. Moosaviun [et al.] // Automation in Construction. – 2025. – Vol. 177. – Art. № 106316.
6. Рахманов, А. С. Автоматизация тестирования безопасности веб-приложений / А. С. Рахманов, П. И. Тутубалин // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых,

Комсомольск-на-Амуре, 12–16 апреля 2021 года. В 4 ч. Ч. 3. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 298–301.
7. Моисеев, В. С. К задаче определения вероятностных характеристик информационной безопасности разрабатываемых автоматизированных систем управления / В. С. Моисеев, П. И. Тутубалин. – Деп. в ВИНИТИ 11.01.2007, № 26-В2007.
8. Saifudinov I. R. Visible structures highlighting model analysis aimed at object image detection problem / I. R. Saifudinov, V. V. Mokshin, P. I. Tutubalin [et al.] // CEUR Workshop Proceedings: IPERS-ITNT 2018 – Proceedings of the International Conference on Information Technology and Nanotechnology, Samara, 24–27 апреля 2018 года. – Samara, 2018. – Vol. 2210. – P. 139–148.
9. Тутубалин П. И. О платформе для реализации проекта искусственная поджелудочная железа / П. И. Тутубалин, А. П. Кирпичников, Р. С. Асадов и др. // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 8. – С. 139–144.
10. Тутубалин, П. И. Оценка криптографической стойкости ассиметричных алгоритмов шифрования RSA и ГОСТ р 34.10-2001 / П. И. Тутубалин // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Тольятти, 20–21 апреля 2017 года. В 4 т. Т. 1. – Тольятти: Волжский университет имени В.Н. Татищева (институт), 2017. – С. 45–56.

УДК 621.396.967:623.76

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ БПЛА С МАЛОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДЬЮ РАССЕЯНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Битехтин А.Д.[1], Глазунов М.И.[1],
Кочетова Ж.Ю.[1,2], д-р геогр. наук, доц., ORCID 0000-0001-8838-9548
[1]ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
[2]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, РФ
zk_vva@mail.ru

Введение. Ударные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа стали приоритетным средством поражения стационарных объектов. Существующие радиолокационные станции (РЛС) дециметрового и сантиметрового диапазонов, рассчитанные на скоростные высотные цели, неэффективны против малоподвижных аппаратов с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) на предельно малых высотах [1]. Типовая береговая двухдиапазонная РЛС, применяемая в системах контроля надводной и воздушной обстановки, обеспечивает разрешение по дальности 8–10 м и круговой обзор с периодом 1 с. Ка-диапазон станции (миллиметровые волны) позволяет обнаруживать воздушные цели на ближних подступах к защищаемому объекту [2].

Цель – определить дальность обнаружения ударного БПЛА с ЭПР 0,3 м² типовой береговой РЛС в Ка-диапазоне и обосновать ее применение для ближней противовоздушной обороны объекта.

Основная часть. Технические характеристики типовой РЛС (Ка-диапазон): несущая частота 33,5–34,1 ГГц, импульсная мощность 10 кВт, длительность зондирующего импульса 55 или 125 нс, период кругового обзора 1 с, поляризация излучения круговая, коэффициент усиления антенны 38,5 дБ, вертикальный угол обзора 7°, разрешение по дальности 8–10 м, по азимуту 0,22° [3].

Согласно сертификату ФАВТ-РТОП-034, базовая станция (импульсная мощность 6 кВт, длительность импульса 125 нс) обеспечивает обнаружение цели с ЭПР 1 м² при дожде интенсивностью 16 мм/ч на дальности 2400 м. Типовая РЛС в Ка-диапазоне имеет импульсную мощность 10 кВт при той же длительности импульса. При тех же параметрах приемника и антенны расчетная дальность обнаружения цели с ЭПР 1 м², определенная масштабированием по закону четвертой степени от энергии зондирующего импульса, составляет не менее 2729 м.

Выполнен расчет дальности обнаружения для типовых ударных БПЛА (таблица 1). ЭПР 0,3 м² соответствует ударным БПЛА самолетного типа с размахом крыла около 7 м и взлетной массой до 300 кг («Лютый»). Подобные аппараты несут боевую часть массой 50–75 кг, летят на дальность свыше 1000 км, и применяются в составе групп. Штанги и стойки неубирающегося шасси формируют центры вторичного излучения в виде уголковых отражателей, что делает ЭПР стабильно измеримой. ЭПР «Bayraktar TB2» принята равной 0,1 м² по экспертной оценке (0,07–0,1 м² для планера с применением радиопоглощающих материалов). ЭПР «UJ-22 Airborne» (размах крыла 4,6 м, взлетная масса 85 кг, планер из кевлара и углеволокна) составляет ~0,05 м².

Таблица 1

Дальность обнаружения БПЛА РЛС «Атлантика-КХ»
при дожде интенсивностью 16 мм/ч

Тип цели	ЭПР, м²	Дальность обнаружения*, м
Ударный БПЛА самолетного типа («Лютый»)	0,3	2018
«Bayraktar TB2»	0,1	1533
«UJ-22 Airborne»	0,05	1289
*Расчет выполнен масштабированием от расчетной дальности 2729 м по закону четвертой степени [4]		

Полученная дальность 2018 м для основной цели недостаточна для дальнего перехвата, но достаточна для ближнего рубежа. При скорости цели 180 км/ч время подлета от рубежа обнаружения до защищаемого объекта составляет ≈40 с. С учетом рубежа начала зоны поражения комплексов ближней ПВО (порядка 100 м от объекта) время на выдачу целеуказания составляет около 38 с. Этого достаточно для передачи данных средствам поражения.

Дополнительно рассчитана минимальная обнаруживаемая ЭПР на фиксированных дальностях при тех же метеоусловиях. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Минимальная обнаруживаемая ЭПР

Дальность, м	Минимальная ЭПР, м²
2000	0,29
1000	0,018
500	0,0011

Двухдиапазонная РЛС серийно выпускается и эксплуатируется в береговых системах контроля обстановки, включая системы управления движением судов и комплексы охраны акваторий. Станция двухдиапазонная: Ка-диапазон обеспечивает высокое разрешение, X-диапазон (3,2 см, импульсная мощность 25 кВт) – устойчивость к атмосферным осадкам. В мирное время станция решает задачу контроля обстановки в своем секторе. При получении сигнала о воздушной угрозе переключается на обзор воздушного пространства.

Заключение. Типовая береговая РЛС в Ка-диапазоне обеспечивает обнаружение ударного БПЛА с ЭПР 0,3 м² на дальности 2018 м в сложных метеоусловиях (дождь 16 мм/ч). Этого рубежа достаточно для выдачи целеуказания комплексам ближней ПВО и организации противодействия. Для аппаратов с меньшей ЭПР дальность снижается до 1289–1533 м, что ограничивает зону применения ближним рубежом. Миллиметровый диапазон не заменяет дециметровые и сантиметровые РЛС дальнего обнаружения, а дополняет их на малых дальностях, где те неэффективны из-за слабого разрешения и пассивных помех. Наличие X-диапазона компенсирует чувствительность Ка-диапазона к осадкам. Использование серийной станции без создания новых позиций делает такой подход экономически оправданным средством усиления противовоздушной обороны объекта.

Список литературы

1. Пелевин, А. С. Исследование возможности обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов радиолокационными станциями обслуживания воздушного движения / А. С. Пелевин, Ж. Ю. Кочетова, О. Д. Гизатуллов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2026: Сборник трудов IX Международного научно-технического форума. В 11-ти томах, Рязань, 03–05 марта 2026 года. Том 1. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2026. – С. 76-84. – EDN BCLHCT.
2. Уколов, М. А. Проектирование радиотехнической системы обнаружения движения объектов / М. А. Уколов // Инновации в науке. – 2018. – № 12(88). – С. 45-46. – EDN YRXOMX.
3. Рубцов, Е. А. Анализ существующих и перспективных систем наблюдения за объектами рабочей площади аэродрома / Е. А. Рубцов, А. Д. Кизилова // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 октября 2021 года. Том 2. – Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2021. – С. 223-228. – EDN JQACPM.

4. Логовский А. С. Технико-экономический показатель эффективности создания радиолокационных систем дальнего обнаружения / А. С. Логовский, Г. Н. Мальцев, А. А. Рахманов, А. В. Тимошенко // Вооружение и экономика. – 2020. – № 2(52). – С. 9-23. – EDN CJWHJG.

УДК 539.5

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕФЕКТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

***Варюхин В.Н.*[1],** д-р физ.-мат. наук, проф., ORCID 0000-0001-7717-8745,
***Малашенко В.В.*[1,2],** д-р физ.-мат. наук, проф., ORCID 0000-0001-7073-8762,
***Малашенко Т.И.*[3]**
[1]ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ
[2]ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
[3]ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, РФ
malashenko@donfti.ru

Введение. Высокоскоростное деформирование функциональных материалов может быть реализовано в условиях интенсивных внешних воздействий как при изготовлении из них различных деталей и механизмов (штамповка, ковка, резка, прессование), так и во время их непосредственного практического использования, особенно в условиях ударного и ударно-волнового нагружения [1-4]. Такое деформирование во многих отношениях отличается от медленного или так называемого квазистатического деформирования, поскольку взаимодействие дислокаций как основных носителей пластической деформации имеет ряд важных и существенных особенностей при ударных нагрузках. Эти особенности являются основными причинами принципиально иного протекания неупругих процессов в условиях ударного нагружения, приводя к весьма существенным отличиям формирования механических свойств металлов и сплавов, а также их поведения в условиях эксплуатации. При интенсивных воздействиях дислокации разгоняются в кристаллах до огромных скоростей – вплоть до околозвуковых (тысячи метров в секунду), что позволяет им преодолевать структурные дефекты металлов динамическим образом.

Целью настоящей работы является применение теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) для анализа высокоскоростной пластической деформации металлов и сплавов.

Основная часть. В основу теории ДВД положена хорошо известная и многократно апробированная модель Гранато-Люкке, которую называют ещё струнной моделью дислокации. Основные положения теории ДВД

изложены в работах [5-7]. Как и в упомянутой выше модели, движение дислокации в рамках теории ДВД описывается уравнением струны (его называют также волновым уравнением). Это уравнение является неоднородным, так как в его правой части содержится сумма компонентов напряжений, инициированных как внешними нагрузками, так и дефектами структуры, распределёнными по кристаллу

$$\frac{\partial^2(vt+w(z,t))}{\partial t^2} - c^2\frac{\partial^2(vt+w(z,t))}{\partial z^2} = \frac{b}{m}\sum_i \tau_{xy}^i \quad . \qquad (1)$$

В данном выражении использованы общепринятые обозначения: v – скорость дислокации, c – скорость звука в материале, b – модуль вектора Бюргерса дислокации, m – её масса.

В рамках теории ДВД модель Гранато-Люкке была существенно модифицирована. Во-первых, в этой модели спектр дислокационных колебаний был линейным, а в теории ДВД рассматривается нелинейный спектр, и эта нелинейность является следствием появления щели Δ

$$\omega(q_z) = \sqrt{c^2 q_z^2 + \Delta^2} \quad . \qquad (2)$$

Эта щель может возникнуть при коллективном действии на дислокацию других дислокаций движущегося ансамбля или неподвижных точечных дефектов, распределённых по кристаллу. Инициировать её появление способно также взаимодействие со свободной поверхностью или границей раздела (так называемые силы изображения). Порядок величины спектральной щели в перечисленных выше случаях определяется выражением

$$\Delta = \frac{c}{L} \quad . \qquad (3)$$

Здесь L – характерный масштаб взаимодействия, порождающего щель или вносящего главный вклад в её формирование. Особый интерес представляет случай, когда спектральную щель порождает магнитоупругое взаимодействие с магнитной системой металла, что может быть реализовано в редкоземельных металлах и их сплавах, обладающих гигантской магнитострикцией. Величина такой щели определяется магнитными характеристиками материала

$$\Delta_M = \gamma\lambda\sqrt{M_0^3} \quad . \qquad (4)$$

Здесь γ – коэффициент, определяемый магнитными константами материала, λ – константа магнитоупругого взаимодействия, M_0 – намагниченность насыщения.

Второе важное отличие теории ДВД заключается в учете конечных размеров точечных дефектов, пренебрежение которыми в ряде случаев приводило к неверным результатам. И, наконец, третья существенная особенность ДВД заключается в учёте динамической анизотропии дислокационного движения, возникающей в случае надбарьерного скольжения.

Учёт перечисленных выше факторов позволил объяснить в рамках теории ДВД многочисленные экспериментальные данные, предсказать новые динамические эффекты, требующие экспериментального подтверждения, и выявить весьма важные общие закономерности динамических процессов в совершенно различных физических системах. В частности, был предсказан эффект сухого трения, ориентационный эффект динамического торможения краевых дислокаций дислокационными петлями, подавление скачков пластической деформации магнитным полем в области низких температур.

Заключение. Теория ДВД позволяет выполнять анализ неупругих процессов в условиях интенсивных внешних нагрузок и выявлять особенности формирования механических свойств металлов и сплавов при их высокоскоростной деформации.

Список литературы

1. Kanel, G.I. Effects of temperature and strain on the resistance to high-rate deformation of copper in shock waves / G.I. Kanel, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2020. – V. 128. – I. 11. – P. 115901-1-115901-8. DOI: 10.1063/5.0021212.
2. Sabzi, H. Composition and process parameter dependence of yield strength in laser powder bed fusion alloys / H. Sabzi, P. Rivera-Díaz-del-Castillo // Materials & Design. – 2020. – V. 195. – Art. № 109024. DOI:10.1016/j.matdes.2020.109024
3. Daniel, N. Dislocation drag and its influence on elastic precursor decay / N. Daniel, Blaschke, J. Darby, Luscher // International Journal of Plasticity. – 2021. – V. 144. – P. 103030. DOI:10.1016/j.ijplas.2021.103030.
4. Singla, A. Hugoniot Elastic Limit of Single-Crystal Tantalum at Normal and Elevated Temperatures Subjected to Extreme Strain Rates / A. Singla, A. Ray // Physical Review B. – 2022. – V. 105. – P. 064102-064107. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.064102.
5. Малашенко, В. В. Особенности скоростной зависимости динамического предела текучести металлов и сплавов в области низких температур / В. В. Малашенко // Физика твёрдого тела. – 2026. –Т. 68. – № 5. – С. 692-695. DOI: 10.61011/FTT.2026.05.63435.9631.
6. Малашенко, В. В. Влияние плотности дислокаций на динамический предел текучести облученных металлов с гигантской магнитострикцией / В. В. Малашенко // Физика твёрдого тела. – 2024. – Т. 66. – № 8. – С. 1403-1407. DOI: 10.61011/FTT.2024.08.58607.60.
7. Malashenko, V. V. The Influence of Collective Effects on the Concentration Dependence of the Yield Stress of Alloys under High-Energy Impacts / V. V. Malashenko // Technical Physics Letters. – 2020. – V. 46. – № 9. – P. 925–927. DOI: 10.1134/S1063785020090242.

УДК 621.391

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ НИЗКОАМПЛИТУДНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА ПО ОДНОМУ ОТВЕДЕНИЮ ДЛЯ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

Гилязов А.Р., Салдаева П.А., ORCID 0009-0003-7599-9904,
Седов С.С., канд. техн. наук, доц.
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
saldaevvva@gmail.com

Введение. Электрическая нестабильность миокарда часто проявляется в виде поздних потенциалов желудочков (ППЖ) – низкоамплитудных сигналов, которые регистрируются в конечной части комплекса QRS электрокардиосигнала (ЭКС). Традиционный метод их выявления, предложенный Simson M.B. [1], опирается на три ортогональных отведения, что создаёт трудности при построении компактных телемедицинских устройств.

Цель работы – разработка алгоритма оценки ЭКС по одному отведению на предмет наличия или отсутствия ППЖ (включая задачу вычисления граничных значений их параметров).

Основная часть. Регистрация ЭКС для оценки ППЖ осуществляется по трём ортогональным отведениям X, Y, Z Франка. В данной работе сделан акцент на анализ ЭКС по отведению Y. Оно является вертикальным и в нём осуществляется оценка измерения электрической активности в направлении «вверх-вниз». Отведение Y чувствительно к изменениям в области нижней стенки левого желудочка, что может быть полезным при оценке ППЖ.

Первый шаг – предварительная обработка сигнала. Исходный ЭКС содержит дрейф изолинии, сетевые помехи и высокочастотный шум, для устранения которых применяется полосовая фильтрация 2-400 Гц и режекторный фильтр 49-51 Гц и сглаживание.

Далее операции привязываются к R-пику – элементу ЭКС с наибольшей амплитудой. Поиск временного положения вершин R-пиков осуществляется в соответствии с алгоритмом Pan J., Tompkins W.J. [2]. В окрестности вершин R-пика выделяется интервал 512 мс (по 256 мс в обе стороны), покрывающий комплекс QRS и сегмент ST – участки возможного проявления ППЖ. Затем осуществляется когерентное накопление выделенных временных интервалов, каждый из которых содержит кардиоцикл. Для более эффективной регистрации ППЖ необходимо осуществить корреляционный анализ и включить в дальнейший анализ кардиоциклы с коэффициентом корреляции выше 0,95 относительно эталона. В качестве эталона выбран третий кардиоцикл ЭКС,

так как в первые секунды регистрации сигнала на его форму могут влиять переходные процессы регистратора.

Накопленные кардиоциклы усредняются: случайный шум уменьшается пропорционально √N, а регулярная составляющая сохраняется, что повышает отношение сигнал/шум и делает ППЖ видимыми. Усреднённый кардиоцикл подвергается цифровой фильтрации в полосе 40-250 Гц. Используется фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ) 170-го порядка. Высокий порядок обеспечивает близкую к прямоугольной амплитудно-частотную характеристику, а КИХ-структура гарантирует устойчивость.

После фильтрации формируется суммарная векторная величина ρ. В [1] величина ρ вычисляется в соответствии с выражением (1):

$$\rho_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}, \quad (1)$$

где X_i, Y_i, Z_i – напряжения по соответствующим отведениям.

В данной работе величина ρ формируется из сигнала одного отведения с введением поправочного коэффициента в соответствии с выражением (2):

$$\rho_i = \sqrt{KY_i^2}, \quad (2)$$

где Y_i – напряжение по соответствующему отведению.

Коэффициент K необходимо рассчитать исходя из уравнения (3):

$$K = \frac{\sum(P_{xyz} * P_y)}{\sum P_y^2}, \quad (3)$$

где P_{xyz} и P_y – массивы данных суммарной векторной величины ЭКС по трём и одному отведению соответственно.

Коэффициент K компенсирует отсутствие двух других компонент и позволяет сохранить сопоставимость амплитудных оценок с трёхканальным прототипом. Коэффициент вычисляется индивидуально для каждого ЭКС, после чего находится его математическое ожидание по выборке.

Завершающая часть алгоритма – расчёт параметров оценки ППЖ:

• длительность фильтрованного QRS-комплекса (fqrs) Dfqrs;

• длительность низкоамплитудных сигналов в конце fqrs LAS40;

• среднеквадратичная амплитуда fqrs в последние 40 мс RMS40 [1].

Выполнение не менее двух из условий означает присутствие ППЖ в ЭКС [1]: Dfqrs > 114 мс, LAS40 > 38 мс, RMS40 < 20 мкВ. Однако они получены для трёхканальной векторной величины, поэтому при переходе к одному отведению прямое их использование некорректно.

Для определения новых порогов по выборке ЭКС проанализированы 134 сигнала из открытого банка данных physionet, базы данных PTB Diagnostic ECG Database [3] с частотой дискретизации 1 кГц и длительностью около 2 минут. В 118 сигналах ППЖ по умолчанию отсутствовали, 16 сигналов по умолчанию имели ППЖ.

Построены распределения каждого параметра отдельно для случаев наличия и отсутствия ППЖ по предложенному алгоритму, описываемые законом Райса. Выбор закона Райса обусловлен тем, что все три параметра оценки ППЖ являются положительными случайными величинами. Точка пересечения кривых распределения выбрана в качестве порога, поскольку в ней вероятность ошибки первого и второго рода сбалансирована.

В результате получены пороговые значения для одноканального алгоритма: Dfqrs > 103 мс, LAS40 > 28 мс, RMS40 < 16 мкВ. Если хотя бы 2 условия соблюдаются, то выносится вердикт о наличии ППЖ в ЭКС. Снижение порогов отражает меньшую амплитуду сигнала одного отведения Y по сравнению с векторной суммой трёх отведений. По предложенному алгоритму в 94 сигналах ППЖ отсутствовали, 40 сигналов имели ППЖ. Вероятность правильного принятия решения по предложенному алгоритму составила 74,7 %.

Существуют схожие работы, в которых осуществлена разработка алгоритма оценки ЭКС на наличие или отсутствие ППЖ. В работе [4], в которой исследовались X-электрокардиосигналы, вероятность правильного принятия решения составила 80,2 %. В работе [5], в которой исследовались Z-сигналы – 73,4 %. Таким образом, при исследовании ЭКС по одному отведению удаётся найти больше случаев ППЖ вне зависимости от выбора отведения. Следует отметить, что в работах [4, 5] вычисление величины ρ вычислялось так же, как в работе [1]. Поэтому целесообразно провести оценку ЭКС по отведениям X и Z с учётом вычисления величины ρ в соответствии с выражением (2).

Заключение. Разработан алгоритм обнаружения ППЖ в ЭКС по отведению Y Франка. Подход упрощает аппаратную часть носимых телемедицинских устройств и пригоден для портативных телемедицинских устройств.

Список литературы

1. Simson M. B. Use of signals in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction / M. B. Simson // Circulation. – 1981. – Vol. 64. – №. 2. – P. 235-242.
2. Pan J. A Real-Time QRS Detection Algorithm / J. Pan, W. J. Tompkins // IEEE Transactions On Biomedical Engineering. – 1985. – Vol. 32. – № 3. – Pp. 230–236.
3. Physionet: PTB Diagnostic ECG Database [Electronical Resource]. URL: https://www.physionet.org/content/ptbdb/1.0.0/ (дата обращения: 10.09.2026).
4. Мухаметзянов О. А. Анализ X-электрокардиосигналов для одноканального устройства регистрации низкоамплитудных составляющих электрических сигналов сердца / О. А. Мухаметзянов // Вестник ПГТУ. – Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 4 (64). – С. 86–92.
5. Мухаметзянов О. А. Анализ влияния сглаживания и корреляционной обработки на оценку информативных низкоамплитудных составляющих Z-электрокардиосигналов / О. А. Мухаметзянов // Вестник ПГТУ. – Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 4 (64). – С. 78–85.

УДК 65.011.56:681.5.08

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ АГРЕГАЦИИ ПОТОКОВ В АДАПТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ АСУ И АСНИ

Данилов В.В., д-р техн. наук, проф., ***Третьяков И.А.,*** канд. техн. наук, доц.,
Подлесный В.Ю., ***Колесник Е.В.***
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
i.tretiakov@mail.ru

Введение. Исследование актуально в связи с потребностью в совершенствовании работы с измерительной информацией в автоматизированных системах управления (АСУ) и автоматизированных системах научных исследований (АСНИ), прежде всего в их информационно-измерительных системах (ИИС) и отдельных подсистемах [1-3]. В рамках ИИС АСНИ подсистема сбора данных решает важную задачу – агрегирует потоки сообщений от различных источников, чтобы передать их через единый канал связи. Грамотная агрегация измерительных сообщений даёт ряд преимуществ: уменьшается нагрузка на каналы передачи данных, ускоряется обработка информации, растёт надёжность итоговых результатов благодаря упорядочиванию данных, снижаются расходы на хранение и передачу сведений, а также появляется возможность масштабировать систему при росте количества измерительных точек.

Основная часть. Существует два метода агрегации случайных потоков в адаптивных системах сбора измерительных данных [4-6]: циклическая коммутация с оконечным буферным запоминающим устройством (БЗУ) и адаптивная коммутация (АК).

Суть метода с использованием БЗУ (рис. 1) состоит в том, что неравномерный групповой поток существенных выборок, образующихся после опроса каждого измерительного канала циклическим коммутатором и последующего адаптивного сжатия данных на общем для всех каналов устройстве, поступает затем в БЗУ. Считывание из БЗУ в линию связи осуществляется на фиксированной частоте, что и обеспечивает равномерный поток сообщений в линии при исходном неравномерном потоке.

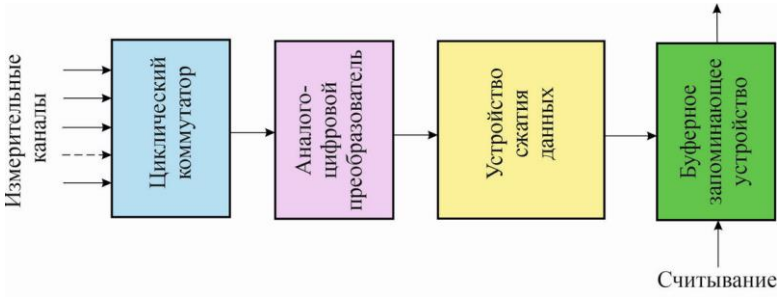


Рис. 1. Метод циклической коммутации с оконечным БЗУ

Адаптивный коммутатор можно представить обобщенной схемой (рис. 2). При таком подходе существенные выборки образуются непосредственно из аналогового сигнала в каждом измерительном канале с помощью устройства адаптивной дискретизации, которое выполняет ту же функцию (сжатое представление измерительного сообщения), что и устройство сжатия данных в методе с БЗУ.

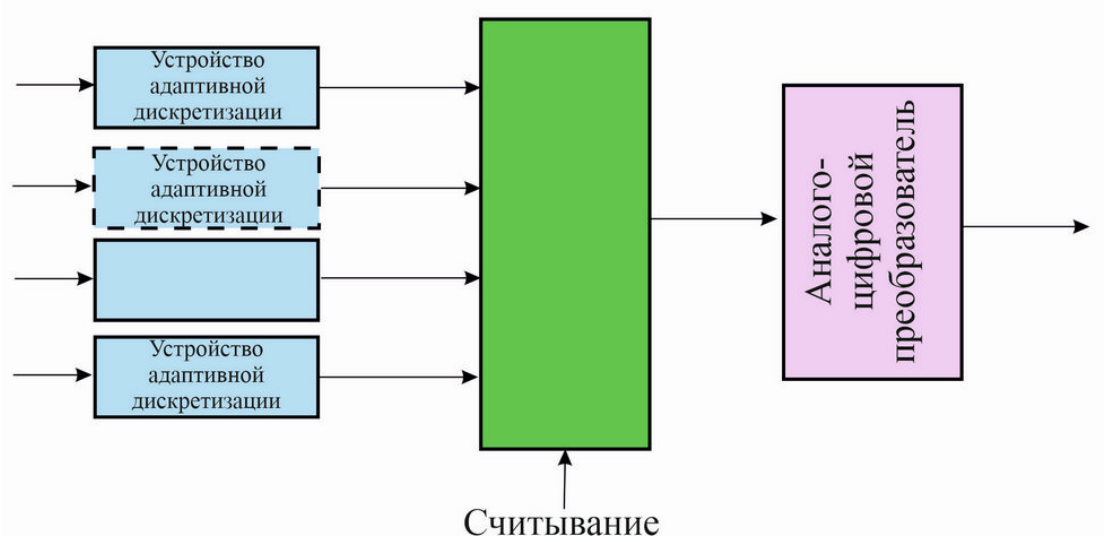


Рис. 2. Метод адаптивной коммутации

Выборка в каждом измерительном канале производится в момент, когда погрешность аппроксимации достигает установленного допустимого порога. Это приводит к формированию параллельных потоков выборок, которые распределены во времени неравномерно и направляются на логическую схему селекции. На каждом такте считывания схема обеспечивает передачу в канал связи выборки только из одного канала. В ситуации, когда в один и тот же такт поступают выборки из двух и более каналов, все они, за исключением одной, утрачиваются (существенный недостаток метода АК). При этом конкретный принцип выбора единственной выборки (например, на основании превышения допустимой погрешности аппроксимации либо по иным критериям) не влияет на дальнейший обобщённый анализ данных.

По сравнению со схемой, использующей БЗУ, АК обладает важным преимуществом: между моментом появления выборки на входе устройства адаптивной дискретизации и её передачей в канал связи нет временной задержки. Причина в том, что схема селекции не предусматривает хранение данных (она либо сразу пропускает выборку, либо отбрасывает её). Отсутствие задержки позволяет вести передачу в режиме реального времени, благодаря чему отпадает необходимость в датировании каждой выборки. В результате объём служебной информации сокращается по сравнению со схемой на базе БЗУ: достаточно передавать только адреса выборок, идентифицирующие их принадлежность к конкретному измерительному каналу.

В адаптивных информационно-измерительных системах ключевым критерием эффективности схем агрегации выступает вероятность потери выборок $P_{пот}$. В схеме с БЗУ потери обусловлены переполнением его ёмкости, а в схеме АК – принудительным стиранием данных. Рост числа потерь напрямую ведёт к увеличению погрешности при восстановлении измерительного сигнала на приёмной стороне на основе поступивших выборок. Следовательно, при сопоставимых условиях предпочтительнее тот метод, который минимизирует вероятность потерь.

Заключение. Таким образом, для оценки эффективности методов агрегации необходимо рассчитать и сопоставить значения вероятности потерь при идентичных потоках выборок, принимая во внимание различия в объёме передаваемой служебной информации. Для решения этой задачи целесообразно использовать инструментарий теории массового обслуживания. С позиций данной теории каждую из рассматриваемых схем допустимо описать в виде модели одноканальной системы массового обслуживания (СМО) [7]. При этом между схемами есть принципиальное различие: схема с БЗУ соответствует СМО с ожиданием, тогда как схема адаптивной коммутации – СМО с отказами. В этой модели под каналом СМО подразумевается канал связи, а под заявкой на обслуживание – появление значимой выборки на входе (либо на входе БЗУ, либо на входе схемы селекции в АК).

Список литературы

1. Панарин В. М. Информационно-измерительная система обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод / В. М. Панарин, А. А. Маслова, Е. М. Рылеева и др. // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 4. – С. 5-18. – DOI 10.5281/zenodo.18229624. – EDN PWBTTT.
2. Баширов, М. Г. Применение промышленных информационно-измерительных и управляющих систем для построения цифровых двойников: опыт разработки на примере процесса гидрирования ацетилена / М. Г. Баширов, К. А. Крышко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2026. – № 1. – С. 5-15. – DOI 10.5281/zenodo.19201696. – EDN XGWVDY.
3. Третьяков И. А. Оценка эффективности адаптивных и циклических систем сбора данных в ИИС АСУ и АСНИ / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, В. Ю. Подлесный и др. // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2026. – № 2. – С. 58-68. – DOI 10.5281/zenodo.20799895. – EDN AKQGKY.
4. Ватолин Д. Методы сжатия данных / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов и др. – Москва: «Диалог-МИФИ», 2003. – 384 с.
5. Авдеев Б. Я. Адаптивные телеизмерительные системы / Б. Я. Авдеев, А. В. Антонюк, С. М. Долинов [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 246 с.
6. Сидякин, И. М. Исследование методов формирования единого потока данных телеизмерений в многоканальной системе регистрации телеметрической информации / И. М. Сидякин, М. А. Эльшафеи // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 4. – С. 254-269. – DOI 10.7463/0415.0764089. – EDN TSHHDF.
7. Wang, Y. Research on the queuing theory based on M/M/1 queuing model / Y. Wang // Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2023. – V. 61. – P. 80-87.

УДК 621.396.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ХИП-ПОМЕХ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОЛЬЦЕВУЮ АНТЕННУЮ РЕШЕТКУ

Егорычев Е.В.,
Чони Ю.И., канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-2787-7959
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ

Введение. Кольцевые антенные решетки зачастую используются для приема запросных импульсно-кодовых посылок в полусфере. Наиболее вероятными и опасными умышленными помехами в этом случае являются ХИП-сигналы на рабочей частоте и при длительности импульсов, совпадающих с запросными сигналами. Для исследования методов подавления таких помех необходимо моделировать сигналы на выходах АР с учетом пространственной структуры источников.

Цель – разработать программу моделирования сигналов на выходах кольцевой АР от совокупности источников помех.

Основная часть. Исходными данными, задаваемыми пользователем, служат параметры источников помех и координаты элементов кольцевой АР. Программой для каждого источника ХИП-помех формируется независимая последовательность импульсов. После чего рассчитываются массивы фазовых сдвигов $\{\Psi_{k,n}\}$ и комплексные множители $\{A_{k,n}\}$. На их основе строится матрица <X>, содержащая сигналы всех антенных элементов.

Далее запускается цикл LMS-адаптации. На каждом временном отсчете берется входной вектор X, рассчитывается выход Y, оценивается мгновенная мощность P_{out} и обновляется вектор весов W. После завершения адаптации рассчитываются входная мощность, выходная мощность, коэффициент подавления и диаграммы направленности.

Моделирование проводилось в MATLAB на уровне комплексных огибающих. Параметры моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры моделирования

Параметр	Значение
Количество элементов кольцевой АР, N	8
Количество источников ХИП-помех, K	3
Направления прихода помех	30°, 90°, 150°
Средние частоты повторения импульсов	900, 1300, 1700 Гц
Частота дискретизации	100 кГц
Время моделирования	0.08 с
Радиус антенной решетки	0.5 λ
Алгоритм адаптации	комплексный LMS
Шаг адаптации, μ	0.0008
Представление сигналов	комплексные огибающие

На рис. 1 приведена структурная схема компенсатора помех.

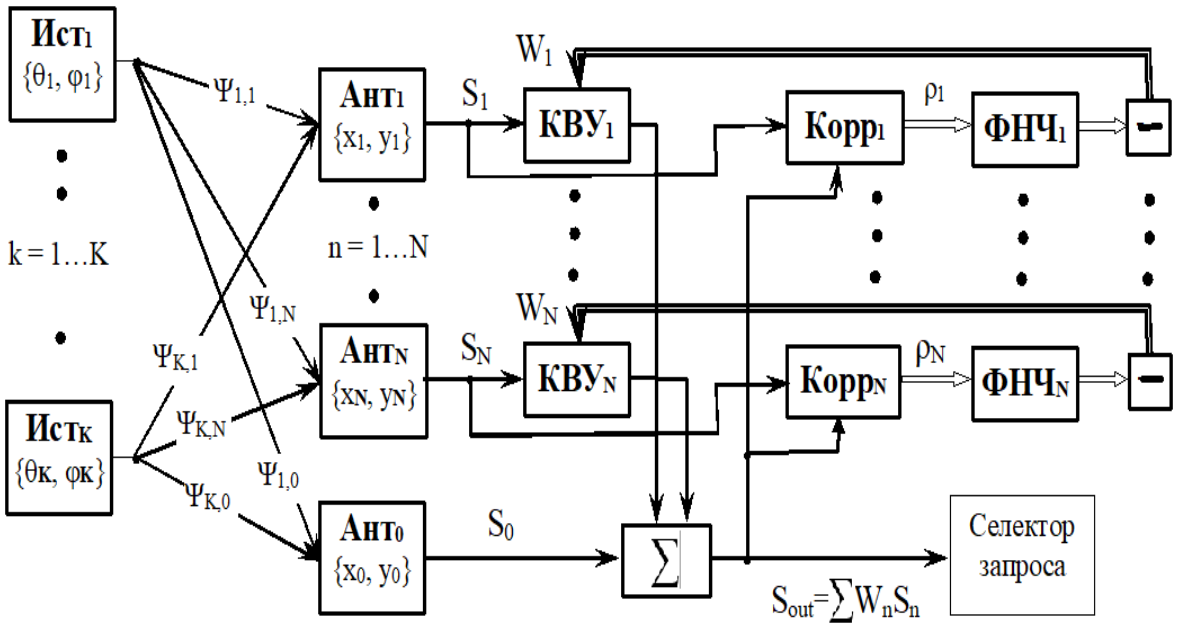


Рис. 1. Структурная схема компенсатора помех по исходному заданию

На рис. 2 приведена диаграмма направленности кольцевой АР до и после адаптации.

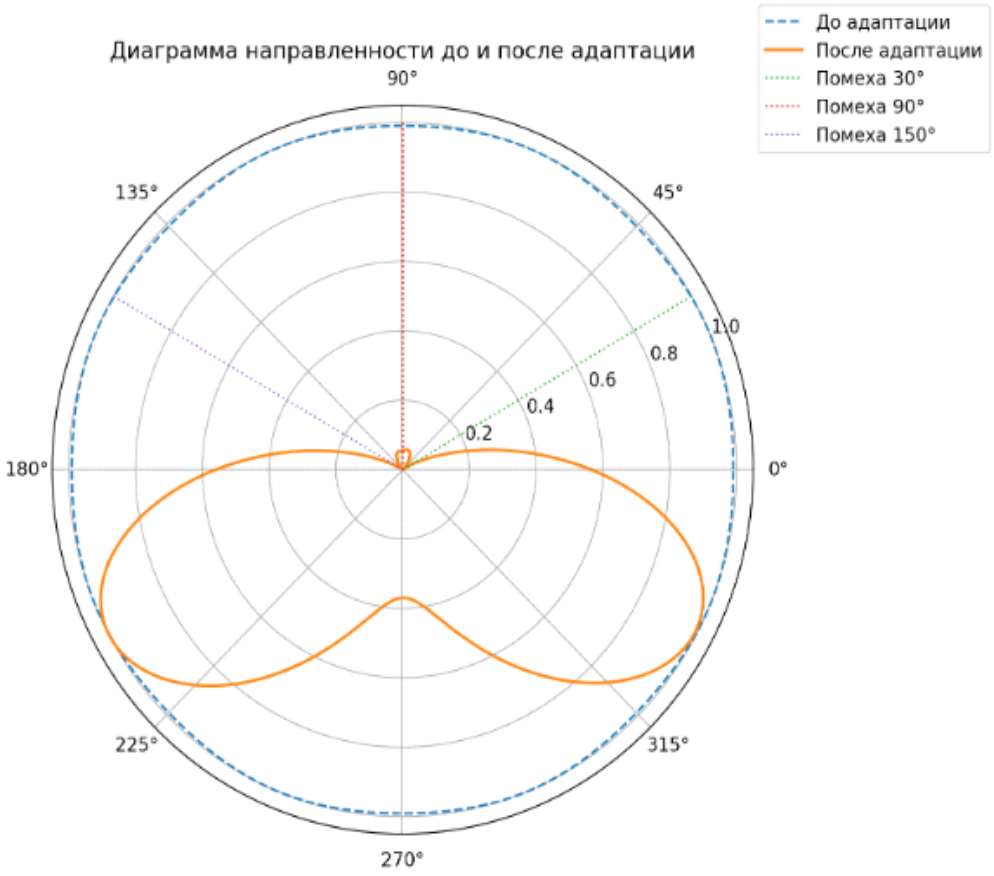


Рис. 2. Диаграмма направленности кольцевой АР до и после адаптации

Анализ моделирования показал: реализации ХИП-помех нерегулярны, амплитуды импульсов случайны, интервалы экспоненциальны. Сигналы на элементах АР суммируют вклады источников с фазовыми сдвигами, обеспечивая пространственную селекцию. После адаптации выход компенсатора сильно снижается; Кпод = 35–45 дБ. ДН имеет провалы на 30°, 90°, 150°, подтверждая подавление помех. Влияние шага μ оценено сравнением значений (таблица 2).

Таблица 2

Влияние шага адаптации LMS на выходную мощность

Шаг μ	Установившаяся P_{out}, дБ	Характер адаптации
0.0002	−28	медленная, устойчивая
0.0005	−35	умеренная
0.0008	−42	оптимальная
0.0012	−45	быстрая, с колебаниями
0.002	−50	неустойчивая

Анализируя таблицу видим, что малый шаг обеспечивает устойчивость, но замедляет настройку; большой шаг ускоряет адаптацию, но повышает риск колебаний. Оптимальным для данной модели принят μ = 0.0008.

Для сравнения эффективности подавления при разных параметрах источников помех была построена таблица 3.

Таблица 3

Влияние параметров источников ХИП на коэффициент подавления

Средняя частота повторения, Гц	Коэффициент подавления $K_{под}$, дБ
900	38
1300	42
1700	45

Из таблицы видно, что с ростом средней частоты повторения импульсов коэффициент подавления увеличивается, что объясняется более эффективной работой LMS-алгоритма при большей статистике импульсов.

Заключение. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность обсуждаемой программы моделирования ХИП-помех.

Список литературы

1. Смирнов, В. В. С50 Устройства СВЧ и антенны: учебное пособие / В. В. Смирнов, В. П. Смолин; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2012. – 188 с. ISBN 978-5-85546-719-2.
2. Малорацкий, Л. Г. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях / Л. Г. Малорацкий, Л. Р. Явич. – Москва: Советское радио, 1972. – 232 с.
3. Pozar D. M. Microwave Engineering. 4th ed. / D. M. Pozar. – Wiley, 2012. – 52 p.
4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
5. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 5th ed. / S. Haykin. – Pearson, 2014. – 912 p.
6. Monzingo R.A. Introduction to Adaptive Arrays / R. A. Monzingo, T. W. Miller. – SciTech Publishing, 2004. – 544 p.

УДК 004.8

АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КАТЕГОРИРОВАНИЯ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ BERT И ИИ-АГЕНТА

Захаров В.А., ORCID 0009-0008-1978-2993,
Савотченко С.Е., д-р физ.-мат. наук, проф., ORCID 0000-0002-7158-9145
ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», г. Москва, РФ

Введение. В информационных системах автоматизированное категорирование конфиденциальной информации (КИ) осложняется разнообразием формулировок и неоднозначностью контекста. В рассматриваемой системе используется конвейер на основе модели BERT и формализованных правил, сопоставляющий найденные фрагменты со справочником тегов.

Цель работы. Предложить развитие этого конвейера за счёт подключения агента на основе большой языковой модели (LLM), не заменяя базовую модель.

Основная часть. Рассматриваемая система предназначена для обработки текстовых документов и сопоставления выявленных фрагментов со справочником, содержащим около 140 тегов. Каждая запись справочника описывается кодом, текстовым описанием, типом идентификатора, видом конфиденциальной информации и категорией конфиденциальности. Внутренний стандарт предусматривает категории К-1, К-2, К-3 и К-4. Результатом работы системы является структурированная разметка, включающая код тега, текст найденного фрагмента, его координаты и соответствующую категорию.

Исходная архитектура включает этапы чтения документа и предварительной обработки текста, распознавания вхождений с помощью BERT, применения правил, постобработки и сопоставления результатов со справочником. Завершающий этап обеспечивает формирование итоговой разметки и отчёта. Использование специализированной модели совместно с правилами позволяет сочетать статистическое распознавание текстовых сущностей с проверяемыми ограничениями предметной области.



Рис. 1. Архитектура исходной системы BERT + rule-based

Предлагаемая архитектура сохраняет существующий конвейер и дополняет его блоком оценки сложности случая и LLM-агентом. Основная идея заключается в том, чтобы не направлять каждый найденный фрагмент на дополнительную обработку языковой моделью, а использовать её только тогда, когда базовая система не дает однозначного решения.

Критериями маршрутизации могут выступать конфликтующие теги, низкая уверенность базовой модели. Если текущая реализация не предоставляет оценку уверенности, первоначальную маршрут можно организовать на основе обнаруженных конфликтов и заранее определённых исключений. Это позволяет внедрять новый компонент постепенно, не требуя полной переработки действующего кода [1, 2].



Рис. 2. Предлагаемая гибридная архитектура с селективным подключением LLM-агента

На вход LLM-агента передаются спорный фрагмент текста, ограниченный контекст, предварительно назначенная метка и описания допустимых тегов из справочника. На основе этих данных агент формирует рекомендацию по уточнению классификации. Например, анализ контекста может быть полезен при различении сведений о физическом лице и организации, если соответствующие теги имеют сходные текстовые признаки, но различаются по смыслу. При этом итоговый выбор должен ограничиваться разрешённым множеством тегов, а не произвольными обозначениями, сформированными языковой моделью [3, 4].

Предлагаемый подход позволяет разделить типовые и сложные случаи обработки. Для однозначных примеров сохраняется существующий путь, а дополнительные вычислительные ресурсы расходуются преимущественно на случаи, требующие контекстного анализа. Ожидаемыми преимуществами являются повышение качества обработки неоднозначных фрагментов, потенциальное улучшение результатов на редких классах и уменьшение необходимости постоянно расширять набор частных правил. Вместе с тем применение LLM может увеличивать время обработки и стоимость вычислений, а также приводить к нестабильным ответам. Поэтому её рекомендации должны рассматриваться как проверяемые предложения, а не как безусловно достоверные решения [5].

Оценка эффективности. Для проверки архитектуры необходимо провести сравнительный эксперимент на едином тестовом корпусе с экспертной разметкой. Целесообразно сопоставить две конфигурации: исходную систему BERT + правила; систему с подключением LLM;. Такое сравнение позволит отдельно оценить потенциальный вклад LLM и практическую эффективность предложенного механизма отбора сложных случаев.

Заключение. Предложена архитектура категорирования конфиденциальной информации, предусматривающая подключение LLM-агента к системе на основе BERT и правил. В отличие от полной замены базовой модели, предложенный подход использует возможности языковой модели для уточнения неоднозначных и сложных случаев. Дальнейшая работа предполагает реализацию, проведение сравнительных экспериментов и оценку соотношения качества, времени обработки и вычислительных затрат.

Список литературы

1. Devlin J. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee [et al.] // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. – Minneapolis: Association for Computational Linguistics, 2019. – P. 4171–4186. – DOI: 10.18653/v1/N19-1423.
2. Yao S. ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models / S. Yao, J. Zhao, D. Yu [et al.] // International Conference on Learning Representations (ICLR). – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2210.03629 (дата обращения: 09.10.2026).
3. Schick T. Toolformer: Language Models Can Teach Themselves to Use Tools / T. Schick, J. Dwivedi-Yu, R. Dessì et al. // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2023. – Vol. 36. – P. 68539–68551. – URL: https://arxiv.org/abs/2302.04761 (дата обращения: 09.10.2026).
4. Tran K.-T., Dao D., Nguyen M.-D. et al. Multi-Agent Collaboration Mechanisms: A Survey of LLMs. – 2025. – P. 2501.06322. – URL: https://arxiv.org/abs/2501.06322 (дата обращения: 09.10.2026).
5. OpenAI. GPT-4 Technical Report. – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2303.08774 (дата обращения: 09.10.2026).

УДК 621.396.2

КОНТРОЛЬ ОРИЕНТАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА, ПОДВЕРЖЕННОГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ИСКАЖЕНИЯМ

Иванов А.С., Потапова О.В., канд. техн. наук, доц.,
Чони Ю.И., канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-2787-7959
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
ivanovalexandr933@gmail.com

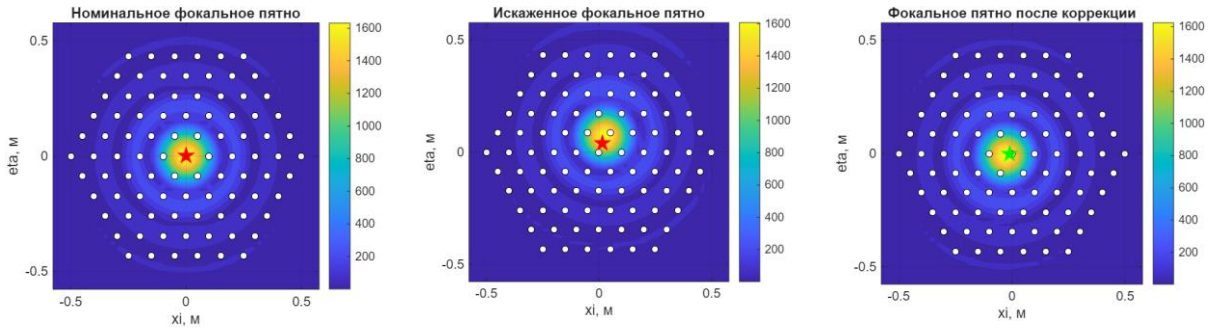
Введение. В глобальных системах телекоммуникаций широко применяются многолучевые гибридные зеркальные антенны (МГЗА), базирующиеся на геостационарных спутниках и формирующие серию лучей, покрывающих рабочую зону на Земле. В процессе эксплуатации под действием неравномерного теплового нагрева, гравитационных нагрузок и остаточных деформаций конструкции профиль крупногабаритного рефлектора испытывает искажения. Наиболее существенным фактором, снижающим энергетические характеристики МГЗА в зонах обслуживания, является смещение ориентации оптической оси рефлектора относительно её номинального положения, приводящее к систематическому уходу всех лучей. Своевременный контроль текущего углового положения оси позволяет оперативно парировать это смещение средствами системы юстировки. Известные подходы к контролю, основанные на оптических и фотограмметрических измерениях отражающей поверхности, требуют большого числа датчиков и сложной бортовой измерительной инфраструктуры. В связи с этим представляет практический интерес электронный контроль ориентации оси, основанный на анализе сигнального отпечатка, формируемого на полотне антенной решётки (АР) при облучении рефлектора сигналом наземного радиомаяка с известными угловыми координатами.

Цель – обсудить возможность и оценить точность контроля текущей ориентации оптической оси электронными средствами.

Основная часть. Рассматривается МГЗА офсетной геометрии (рис. 1), которая представляет собой вырезку из параболоида вращения с фокусным расстоянием F = 7.4 м, высекаемую цилиндром радиуса R = 6 м, который смещен относительно оптической оси на расстояние H = 3 м, длина волны $\lambda = 0.15$ м. Облучатель в виде антенной решетки (АР) с шагом d = 0.1 м образует гексагональную структуру из N = 91 элементов.

При облучении рефлектора плоской волной с направления (θ_0, φ_0) на элементах АР наводятся комплексные амплитуды $\{S_n\}$, n = 1…N, образующие сигнальный отпечаток. При искажении ориентации оси отпечаток смещается по полотну АР. Смещение описывается двумя углами

поворота – α (вокруг Oy) и β (вокруг Oz). Сигнальные отпечатки фокальных пятен показаны на рис. 1.



а) номинальный сигнальный отпечаток

б) сигнальный отпечаток при искажении ($\alpha = 0.2°$, $\beta = 0.1°$)

в) скорректированный сигнальный отпечаток

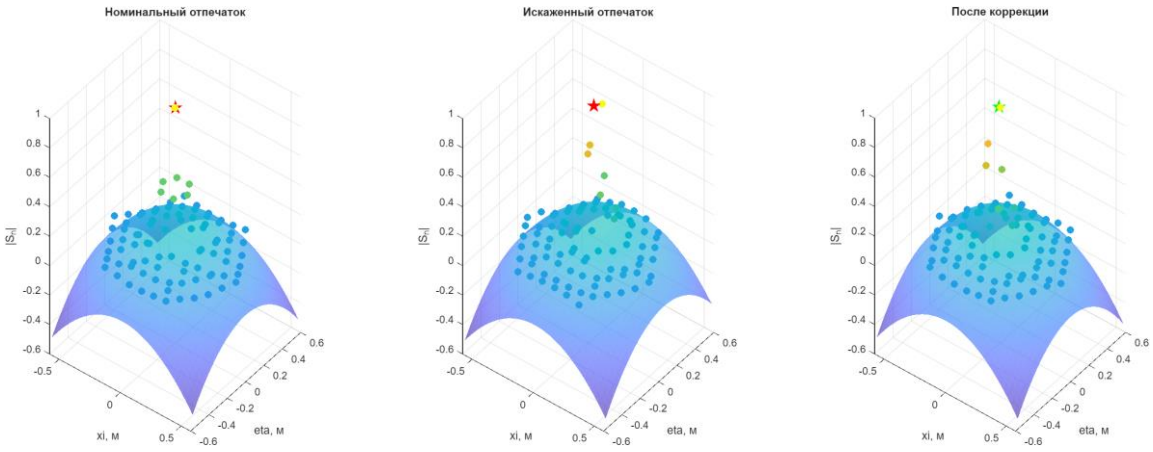
Рис. 1. Расположение сигнальных отпечатков

Для определения углов поворота α, β и корректировки оптической оси, амплитудный рельеф A(ξ,η) аппроксимируется полиномом второй степени $A(\xi, \eta) = c_1 + c_2\,\xi + c_3\,\eta + c_4\,\xi^2 + c_5\,\eta^2 + c_6\,\xi\,\eta$. Далее определяются координаты максимума сигнального отпечатка и искомые углы поворота:

$$\alpha = (\eta_0 - \eta_{max})/2L, \qquad \beta = (\xi_0 - \xi_{max})/2L,$$

где L – расстояние от центра раскрыва до номинального фокуса.

Сигнальные отпечатки, показанные на рис.2, рассчитывались методом электродинамического моделирования МГЗА для серии углов α, β. Для каждого варианта выполнялась полиномиальная аппроксимация и оценка углов. Результаты корректировки углов показаны на рис. 3 и таблице.



а) номинальный сигнальный отпечаток

б) сигнальный отпечаток при искажении ($\alpha = 0.2°$, $\beta = 0.1°$)

в) скорректированный сигнальный отпечаток

Рис. 2. Вид сигнальных отпечатков

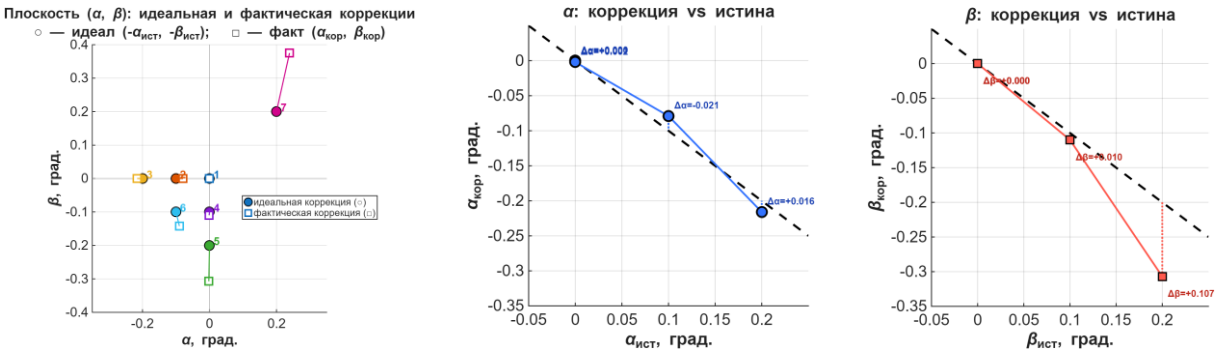


Рис. 3. Результаты контроля ориентации оси

Таблица

Результаты контроля ориентации оси

$\alpha_{ист.}$, °	$\beta_{ист.}$, °	$\alpha_{кор.}$, °	$\beta_{кор.}$, °	$\Delta\alpha$, °	$\Delta\beta$, °
0	0	0	0	0	0
0.1	0	-0.079	0	-0.021	0
0.2	0	-0.216	0	0.016	0
0	0.1	-0.001	-0.11	+0.001	+0.01
0	0.2	-0.002	-0.307	+0.002	+0.107
0.1	0.1	-0.09	-0.142	-0.01	+0.042
-0.2	-0.2	+0.239	+0.375	-0.039	-0.175

Относительная погрешность оценки угла α не превышает 21% (средняя абсолютная погрешность 0.022°). Оценка угла β завышена в 1.1–1.9 раза относительно истинного значения; максимальная абсолютная погрешность 0.175° при $\beta_{ист.}$=−0.2°, что обусловлено искажениями, присущими офсетной геометрии.

Заключение. Результаты моделирования подтверждают возможность контроля ориентации оптической оси искаженного рефлектора исходя из смещения максимума сигнального отпечатка. Предложенный способ контроля позволяет определить углы отклонения оптической оси с незначительными погрешностями.

Список литературы

1. Чони Ю. И. Stabilization of beams of a large-size satellite antenna by adaptive adjusting of hexagonal seven-element clusters / Ю. И. Чони и др. // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (2019 SYNCHROINFO) – IEEE, 2019. – С. 1-5.
2. Чони Ю. И. Retrieving best-fit paraboloid from signals of a ground based beacon for electroic compensation of satellite multi-beam hybrid reflector antenna distortions / Ю. И. Чони и др. // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2021. – С. 1-5.
3. Голдобин Н. Н. Анализ эффективности орбитальной юстировки крупногабаритного рефлектора / Н. Н. Голдобин // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 1. – С. 97-99.
4. Имбриале У.А. Distortion compensation techniques for large reflector antennas / У.А. Имбриале // 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 01TH8542). – IEEE, 2001. – Т. 2. – vol. 2. – С. 2/799-2/805

УДК 537.874.33

РЕФРАКЦИЯ РАДИОЛУЧА В ТРОПОСФЕРЕ

Исмагилов Р.Г., канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0009-0005-6469-6291
ФГКВОУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург, РФ
ravismagilov@yandex.ru

Распространение радиоволн в атмосфере – это важный и интересный вопрос, который следовало бы включать в курсы физики многих ВУЗов уже просто ввиду его практической значимости. Учет всех аспектов требует, конечно, использования специальных вычислительных программ. Но это не исключает возможности ознакомления студентов с явлениями, связанными с распространением радиоволн по-отдельности с использованием моделей, в которых вычисления не сложно провести и проанализировать явно.

В этой работе будет рассмотрена рефракция (изменение направления распространения) радиоволн в тропосфере. Причиной рефракции в этом случае является зависимость показателя преломления от высоты, которая связана с изменением метеопараметров: температуры, давления, влажности.

Ограничимся пока простейшим случаем линейной зависимости показателя преломления от высоты *y*:

$$n(y) = n_0 + n_1 y \qquad (1)$$

Для решения задачи используем метод эйконала [1], который был ранее использован в задаче о рефракции радиоволн в ионосфере [2].

Для определения траектории луча в среде с переменным показателем преломления сначала найдем зависимость от координат эйконала $L(x,y,z)$ – функции, показывающей наименьший оптический путь до заданной точки пространства. Для этого следует решить уравнение (эйконала):

$$\left(\vec{\nabla}L\right)^2 = n^2 \qquad \text{или} \qquad \left(\frac{\partial L}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial z}\right)^2 = n^2(x,y,z)\,, \qquad (2)$$

где $n(\mathbf{r})$ – показатель преломления как функция координат. После этого траектория луча может быть определена решением дифференциального уравнения

$$n \cdot \frac{d\vec{r}}{ds} = \vec{\nabla}L \qquad (3)$$

где s – расстояние, измеренное вдоль луча. Это уравнение означает, что лучи идут перпендикулярно волновым поверхностям.

Поскольку показатель преломления среды зависит только от *y*, и нас интересуют только точки в плоскости распространения луча, то решение уравнения (2) ищем в виде

$$L = L(x,y) = kx + f(y),$$

где k – безразмерная константа. Тогда уравнение (3) превращается в

$$k^2 + (f'(y))^2 = n^2(y).$$

С точностью до несущественной константы решение такого уравнения имеет вид:

$$f(y) = \pm \int_0^y \sqrt{n^2(y) - k^2}\, dy.$$

Поэтому эйконал равен:

$$L(x, y) = kx + f(y) = kx \pm \int_0^y \sqrt{n^2(y) - k^2}\, dy.$$

Градиент эйконала, необходимый для решения уравнения (3), тогда равен

$$\vec{\nabla} L = \vec{\imath} \cdot k \pm \vec{\jmath} \cdot \sqrt{n^2(y) - k^2}$$

Подставив это выражение в уравнение (3) можно найти уравнение траектории луча явно:

$$y = \frac{k}{n_1} \cdot ch\left(n_1 \cdot \frac{x}{k} + arcch\left(\frac{n_0}{k}\right)\right) - \frac{n_0}{n_1} \qquad (4)$$

При n_1=0 рефракция отсутствует, и это уравнение задает прямую линию с углом наклона α, который задается параметром k:

$$k = n_0 \cdot cos(\alpha). \qquad (5)$$

При положительном градиенте показателя преломления (n_1>0) решение (4) быстро растет, и радиолуч удаляется от поверхности Земли.

Как правило, показатель преломления в тропосфере уменьшается с ростом высоты вследствие уменьшения концентрации молекул, и n_1<0. В этом случае решение (4) удобно переписать в следующем виде:

$$y = -\frac{k}{|n_1|} \cdot ch\left(\frac{|n_1|x}{k} - arcch\left(\frac{n_0}{k}\right)\right) + \frac{n_0}{|n_1|} \qquad (6)$$

Решение проходит через максимум и возвращается к прежнему уровню. Графики решений для всех трех случаев показаны на рисунке.

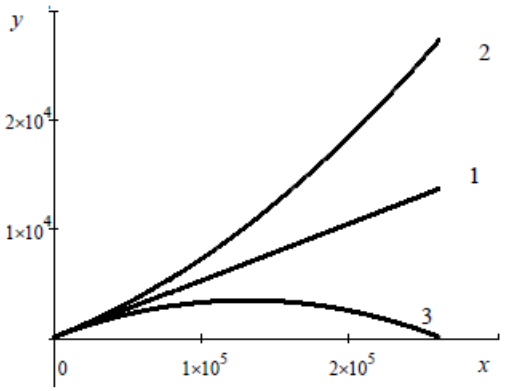


Рис. Траектория луча при различных значениях градиента показателя преломления: 1) n_1=0, 2) n_1= 40·10^{-8} м$^{-1}$, 3) n_1= –40·10^{-8} м$^{-1}$

Параметр k в уравнениях (4) и (6) определяет теперь только начальный наклон луча α и связан с производной $y'(0)$:

$$k = \frac{n_0}{\sqrt{1 + \left(y'(0)\right)^2}}, \qquad y'(0) = tg(\alpha). \tag{7}$$

Координаты точки, где достигается максимальная высота траектории луча могут быть найдены из (4):

$$x_m = \frac{k}{|n_1|} arcch\left(\frac{n_0}{k}\right), \qquad y_m = \frac{n_0}{|n_1|}(1 - cos(\alpha)). \tag{8}$$

Поэтому расстояние до точки возврата луча к поверхности Земли $L = 2x_m$.

В точке максимального подъема показатель преломления уменьшается до значения

$$n(y_m) = n_0 - |n_1| y_m = n_0 cos(\alpha). \tag{9}$$

Заметим, что вытекающее отсюда выражение для начального угла наклона α

$$cos(\alpha) = n(y_m)/n_0$$

соответствует привычному выражению для предельного угла полного внутреннего отражения, но с заменой синуса на косинус, поскольку α – это угол скольжения, а не угол падения.

Поскольку Земля круглая, то для возвращения луча к земной поверхности необходимо, чтобы радиус кривизны траектории луча был бы меньше радиуса Земли [3]. Тогда из (4) следует, что градиент показателя преломления должен удовлетворять неравенству $|n_1| > 15{,}7 \cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$. Так для значения $n_1 = -40 \cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$ и угла $\alpha = 3^o$ получим: $L \approx 260$ км, а максимальная высота $y_m = 3{,}4$ км. (Значение угла $\alpha = 3^o$ было выбрано для того, чтобы луч не выходил за пределы тропосферы.) Таким образом, при градиенте показателя преломления порядка $n_1 = -40 \cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$ у поверхности Земли возникает атмосферный волновод, в котором может распространяться радиолуч (УКВ – диапазона). Область распространения луча ограничена высотой y_m, на которой выполняется условие (9) и поверхностью Земли $y=0$.

Список литературы

1. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – Москва: Наука, 1973. – 720 с.
2. Исмагилов Р. Г. Рефракция радиолуча в ионосфере / Р. Г. Исмагилов // II научно-практическая конференция «Особенности методики обучения физике в военных и технических вузах»: Сборник материалов. – СПб.: ВАС, 2026. – 116 с.
3. Бибарсов М. Р. Электромагнитные поля и волны: Учебник / М. Р. Бибарсов, В. И. Власенко, Р. Ю. Бородулин и др. – СПб.: ВАС, 2019. – 144 с.

УДК 004.056

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В МЕССЕНДЖЕРАХ

Истратова Е.Е., канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-9759-2249,
Ермаков А.В.
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск, РФ
istratova@corp.nstu.ru, ermakov@corp.nstu.ru

Введение. Современные мессенджеры играют ключевую роль в обмене информацией между пользователями, включая передачу различных типов данных, таких как: текстовые сообщения, голосовые записи и графические файлы. С ростом популярности мессенджеров и увеличением объема контента вопросы обеспечения защиты передаваемых данных становятся все более актуальными.

Для защиты данных в мессенджерах могут применяться как классические методы, так и самописные решения. К классическим методам относятся следующие:

1) сквозное шифрование;
2) шифрование при передаче;
3) двухфакторная аутентификация;
4) шифрование резервных копий;
5) аутентификация.

Таким образом, вопрос защиты информации при организации передачи данных в мессенджерах является актуальным и востребованным.

Цель исследования заключалась в проведении сравнительного анализа методов защиты информации при организации передачи данных в мессенджерах.

Основная часть. Анализ источников литературы показал, что часть исследований сосредоточена на изучении инструментов и методов анализа сетевого трафика, включая разработку моделей для классификации, выявления особенностей и обеспечения конфиденциальности данных. В работе [1] предложена методика Traffic Graph Adaptive Convolutional Neural Network (TGAC), основанная на графовом представлении сетевого трафика. Использование адаптивных сверточных слоев позволяет эффективно выделять признаки локальных узлов, формируя устойчивые представления данных независимо от их типа. Данный подход доказывает эффективность графовых нейронных сетей при классификации децентрализованных приложений, в том числе в условиях шифрования и высокой схожести трафика.

Вопросы формирования репрезентативных выборок рассматриваются в исследовании [2]. Указанный подход основан на мониторинге

данных в локальной сети при помощи аппаратных датчиков. Авторы предлагают комплексный конвейер обработки: от десенсибилизации и очистки до маркировки трафика, что позволяет создавать наборы данных, максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации.

При этом в статье [3] рассматривается проблема дисбаланса классов при применении методов машинного обучения к сетевому трафику. Неравномерное распределение данных может снижать точность классификации и смещать границы принятия решений. Для решения этой задачи предложена стратегия группового взвешивания, которая объединяет классы в группы, корректирует их веса в процессе обучения и учитывает взаимное влияние различных категорий трафика. Такой подход обеспечивает более гибкое представление информации и позволяет моделям машинного обучения эффективно работать с множественными типами данных, включая редкие и малочисленные классы.

Другая часть публикаций сосредоточена на вопросах защиты данных и управления рисками в цифровой среде. Так, в статье [4] представлен проект защищенного мессенджера «CryptoMess», реализующий постквантовые алгоритмы (CSIDH, Falcon) в сочетании с AES. Работа демонстрирует практическую реализацию криптографических протоколов для обеспечения целостности и конфиденциальности коммуникаций. В работе описана проверка исходного кода на безопасность, что позволяет оценивать методы применения постквантовой криптографии в прикладных системах связи и формирует практическую основу для построения безопасных коммуникационных платформ.

Вопросы защиты приватности в социальных сетях освещены в материалах исследования [5], авторы которого предлагают гибридный метод Hybrid KLT, объединяющий принципы K-анонимности, L-разнообразия и T-близости. Данный подход позволяет минимизировать риски семантических атак, сохраняя при этом аналитическую ценность данных.

Статья [6] описывает метод управления данными в социальных сетях, объединяющий дифференцированную приватность и многоуровневое групповое соглашение. Предложенная архитектура с использованием региональных блокчейнов и специализированный алгоритм обеспечивают повышенную надежность и доступность данных. Данное решение демонстрирует, как современные методы могут успешно сочетать требования безопасности и согласованности в крупных распределенных системах.

Таким образом, анализ источников литературы подтвердил актуальность данной темы, показав, что вопросы анализа, классификации и защиты сетевого трафика, обеспечения конфиденциальности и управления метаданными продолжают активно исследоваться. Рассмотренные работы демонстрируют значительное внимание к развитию методов идентификации приложений, обработки трафика и применения современных

криптографических и постквантовых технологий, что подчеркивает необходимость дальнейшего изучения этих направлений.

В связи с тем, что самописные решения не всегда имеют открытый исходный код и плохо адаптируются для решения универсальных задач, в качестве основы для проведения сравнительного анализа были выбраны следующие классические методы:

1) сквозное шифрование;
2) шифрование при передаче;
3) двухфакторная аутентификация.

Сравнение классических методов защиты данных в мессенджерах осуществлялось на основе следующих критериев: уровень безопасности и доступ к данным на сервере.

Заключение. Несмотря на то, что стопроцентную защиту от утечки информации не предоставляет ни одна программа мгновенного обмена сообщениями, однако для максимальной защиты данных предпочтительным является сквозное шифрование, так как оно обеспечивает конфиденциальность даже от разработчика мессенджера. В результате чего подобные решения, в которых E2EE включено по умолчанию, предоставляют наиболее высокий уровень защиты при передаче данных.

Список литературы

1. Саварин, И. В. Метод защиты изображений, передаваемых через мессенджер / И. В. Саварин // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 12 (120). – С. 12-24.
2. Пономаренко, А. Е. Исследование использования криптографии в мессенджерах / А. Е. Пономаренко, А. Р. Багаутдинова, Д. А. Лукьянов // Auditorium. – 2025. – № 2 (46). – С. 25-30.
3. Коренева, А. М. Сравнительный обзор безопасности популярных корпоративных мессенджеров / А. М. Коренева, И. В. Саварин // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 8 (116). – С. 47-69.
4. Саварин, И. В. Развитие метода защиты конфиденциальных файлов в мессенджере на основе системы адаптивной аутентификации и блокирования при аномальной активности / И. В. Саварин // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 11 (131). – С. 51-61.
5. Каримова, А. Ю. Метаданные как угроза конфиденциальности личной информации / А. Ю. Каримова // E-Scio. – 2023. – № 4 (79). – С. 24-32.
6. Скурихин, Е. О. Использование современных методов защиты информации при организации обмена данными в сети / Е. О. Скурихин, Е. В. Ткаченко, Н. С. Мороков // Молодой исследователь Дона. – 2021. – № 5 (32). – С. 79-84.

УДК 004.773

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ 5G НА КОРПОРАТИВНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

Истратова Е.Е., канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-9759-2249,
Лавринович А.Б., Ложкин А.С.
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск, РФ
istratova@corp.nstu.ru, e-mail_qiromi@yandex.ru, scorbey@vk.com

Введение. Для корпоративных информационных систем развитие мобильных сетей важно не только из-за высокой скорости доступа, но и потому, что в инфраструктуре предприятия через мобильную сеть могут работать датчики, терминалы, камеры, производственное оборудование, сотрудники и удаленные площадки, причем требования этих приложений сильно различаются. Поэтому переход от 5G к 5G-Advanced, а затем к 6G интересен, прежде всего, изменением архитектуры: сеть постепенно становится программно управляемой средой, связанной с виртуализацией, вычислениями и автоматизацией.

Цель исследования заключалась в выявлении тенденций развития технологии 5G и изучении их влияния на эксплуатацию корпоративных компьютерных сетей.

Основная часть. Современные корпоративные компьютерные сети перестают быть каналами связи для всех сервисов компании, так как часть функций реализуется программно, ресурсы можно распределять по классам трафика, а отдельные сервисы формируют различные требования к качеству обслуживания. Примером является распределенная сеть, представляющая собой технологию виртуализации, которая делит физическую инфраструктуру мобильной сети на отдельные независимые подсети. Причем каждая такая виртуальная подсеть имеет собственные ресурсы и параметры качества обслуживания [1]. Для предприятия подобный подход удобен, поскольку системы видеонаблюдения, телеметрии и управления оборудованием могут использовать общую физическую инфраструктуру, но не обязаны обслуживаться по одинаковым правилам. С другой стороны, появляется новая зависимость прикладной системы от сетевых политик: ошибка в настройке подсети или нехватка выделенных ресурсов уже напрямую влияет на работу приложения.

5G-Advanced является логическим развитием и продолжением технологии 5G [2]. Среди последних направлений данной технологии можно выделить следующие моменты: эволюция MIMO, позиционирование, XR, развитие NTN, поддержка устройств RedCap, а также применение AI/ML в радиоинтерфейсе и RAN, то есть часть изменений связана с радиодоступом, но для корпоративных сетей эффект

проявляется в том, что становится проще строить приложения, которым нужны точное позиционирование, мобильные терминалы, промышленный Интернет вещей или работа за пределами обычного наземного покрытия. Для наглядности основные архитектурные изменения и их влияние на корпоративные сети сведены в таблицу.

Таблица

Архитектурные изменения и их влияние на корпоративные сети

Направление	**Изменения**	**Значение**
5G SA / 5GC	Собственное ядро 5G, разделение CP/UP, виртуализация функций	Более гибкое подключение сервисов и возможность программного управления сетевыми функциями
Network slicing	Логически изолированные сегменты с разными QoS и ресурсами	Разные требования для IoT, видео, мобильных рабочих мест и критичных приложений
5G-Advanced	AI/ML в RAN, позиционирование, XR, NTN, дальнейшее развитие радиодоступа	Новые сценарии автоматизации, локализации, удаленной работы и промышленного IoT
6G	Интеграция связи, вычислений и мониторинга; нативный интеллект; более сложная многосетевая архитектура	Приложения теснее зависят от облачных хранилищ, данных сети и автоматизированного управления ресурсами

С точки зрения эксплуатации ИТ-инфраструктуры предприятия, чем больше функций переносится в программную и виртуализированную среду, тем сильнее сеть сближается с обычной вычислительной инфраструктурой. В рамках технологии 5G используются NFV, edge cloud и core cloud [1]. В результате для корпоративной сети становится реальным сценарий, когда часть обработки выполняется рядом с точкой радиодоступа, а часть – в центральном облаке или в центре обработки данных. Это уменьшает путь данных для приложений, чувствительных к задержке, но одновременно добавляет новые узлы, для которых необходимо осуществлять мониторинг и защиту данных. В 6G эта тенденция продолжается, так, судя по результатам исследований [1-3], выделяют следующие пять направлений развития архитектуры мобильных сетей: интеграция разных сетей в трехмерной среде; повышение безопасности и доверенности данных; объединение связи, вычислений и данных мониторинга в более гибкую и энергоэффективную архитектуру; применение искусственного интеллекта. Для корпоративных приложений наиболее интересна именно интеграция, благодаря которой сеть не только передает данные, но может участвовать в их получении, первичной обработке и выборе вычислительных ресурсов. Например, производственная система может использовать радиосеть не только для

передачи телеметрии, но и как часть механизма позиционирования и наблюдения за объектами. Системы цифровых двойников получают смысл не как отдельная визуализация, а как постоянно обновляемая модель, связанная с промежуточными узлами и физическим оборудованием.

При этом 6G пока нельзя описывать как готовый набор параметров, который предприятие сможет просто купить и внедрить. Во многих литературных источниках данная архитектура рассматривается как направление дальнейшей эволюции, а ее технические моменты остаются предметом исследований [3]. Поэтому для корпоративных сетей целесообразнее оценивать не рекламные прогнозы скорости, а устойчивые архитектурные тенденции: программируемость сети, перенос вычислений ближе к источникам данных, интеграцию с системами искусственного интеллекта, развитие позиционирования и более тесную связь сетевой инфраструктуры с приложением.

Заключение. Таким образом, 5G-Advanced является промежуточным этапом между уже сложившейся архитектурой 5G и более глубокой перестройкой, ожидаемой в 6G. Для предприятия это означает постепенное изменение роли сети: из транспорта она превращается в часть вычислительной и сервисной платформы. Выигрыш для прикладных систем состоит в более гибком распределении ресурсов и появлении новых сценариев IoT, XR и автоматизации, но вместе с этим растут требования к мониторингу, безопасности и компетенциям ИТ-службы. Поэтому влияние 5G-Advanced и 6G на корпоративные компьютерные сети стоит оценивать не только по скорости канала, а по тому, как меняется вся цепочка «устройство – сеть – вычисления – облако – приложение».

Список литературы

1. Михайлова, И. А. Особенности построения и функционирования ядра сетей 5G / И. А. Михайлова // Экономика и качество систем связи. – 2021. – № 3. – С. 78-85.
2. Chen, W. 5G-Advanced Toward 6G: Past, Present, and Future / W. Chen, X. Lin, J. Lee et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2023. – Vol. 41, № 6. – P. 1592-1619. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3274037.
3. Wang, C. X. On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds / C. X. Wang, X. You, Gao et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – Vol. 25, № 2. – P. 905-974. DOI: 10.1109/COMST.2023.3249835.

УДК 534.44:004.9

ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ИНТЕРАКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХ

Канныкин С.В., канд. физ.-мат. наук, доц., ORCID 0000-0001-8756-5722,
Моргачев Н.С.
ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
svkannykin@yandex.ru

Введение. В прикладной акустике и обработке сигналов сепарация полезной речи от интенсивного шума относится к числу наиболее трудоемких задач (например, при расшифровке записей бортовых самописцев). Акустическая обстановка в кабине воздушного судна характеризуется мощным широкополосным и тональным зашумлением от двигателей и аэродинамических потоков, из-за чего отношение сигнал/шум принимает существенно отрицательные значения.

Цель работы – математическое обоснование и программная реализация кроссплатформенного веб-комплекса для частотного анализа и интерактивной фильтрации акустических сигналов с применением высокодобротных звеньев бесконечной импульсной характеристики (БИХ/IIR).

Основная часть. Анализ зашумленного сигнала во временной области (рис. 1) не позволяет разделить фазовые траектории речи и шума. Переход в частотную область базируется на прямом интегральном преобразовании Фурье [1]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \qquad (1)$$

Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) снижает вычислительную сложность, обеспечивая расчет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в реальном времени.

Частотная декомпозиция позволяет классифицировать физическую природу помех и применить адекватные математические фильтры:

1. Низкочастотный структурный шум (0–300 Гц). Обусловлен вибрацией конструкции планера и маскирует форманты гласных звуков. Для его подавления используется фильтр высоких частот (ФВЧ), освобождающий динамический диапазон для информативных средних и высоких частот.

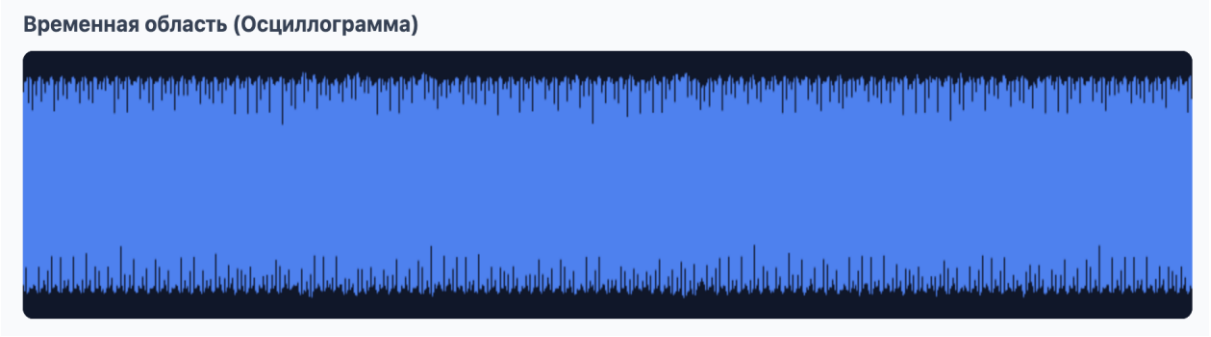


Рис. 1. Осциллограмма сигнала с отрицательным отношением сигнал/шум

2. Тональные резонансные помехи (лопатки турбин, бортовая сеть 400 Гц). Проявляются на спектре узкими пиками высокой амплитуды. Для их вырезания применяется режекторный фильтр. Его ключевой физический параметр – добротность Q колебательной системы [2]:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \tag{2}$$

где f_0 – частота резонанса, Δf – полоса заграждения на уровне -3 дБ.

Высокая добротность (Q > 10) исключает искажения соседних формант речи, свойственные прямому обнулению спектральных отсчетов (явление Гиббса).

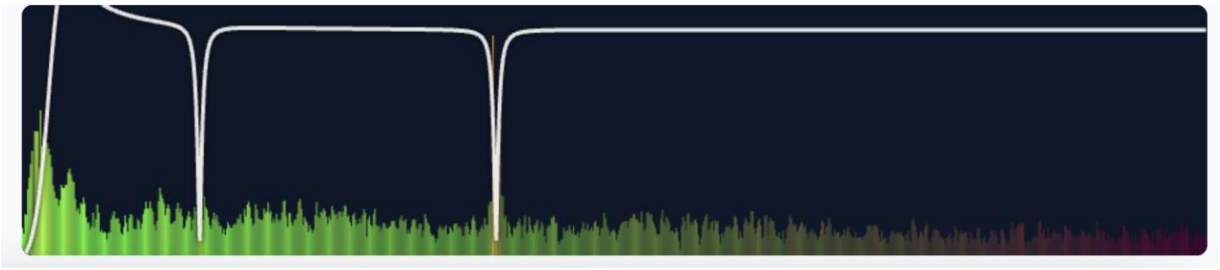


Рис. 2. АЧХ зашумленного сигнала и кривая эквализации IIR-фильтров

Программная часть выполнена на стеке HTML5/JavaScript с аппаратным ускорением Web Audio API [3].

Аудиосигнал последовательно проходит через цепь узлов (Audio Routing Graph): источник → ФВЧ BiquadFilterNode → каскад режекторных фильтров с регулируемой добротностью → усилитель GainNode → спектроанализатор AnalyserNode (окно БПФ 4096) → аудиовыход.

В комплексе реализован предварительный фоновый рендеринг (OfflineAudioContext), строящий усредненный спектр мощности до запуска фонограммы. Для точной настройки реализована функция масштабирования частотной оси: программный пересчет индексов БПФ позволяет растянуть сектор спектра на весь экран, повысив разрешающую способность до 1 Гц/пиксель (рис. 3). Апробация алгоритма на реальных зашумленных записях (ФВЧ на 320 Гц и два режекторных фильтра на 1500 и 4000 Гц (при Q = 15) показала переход фонограммы из категории «неразборчиво» в категорию «удовлетворительная разборчивость».



Рис. 3. Масштабирование спектра для прецизионного наведения фильтра

Экспорт очищенного массива в формат .wav реализован в браузере с помощью объектов DataView и Blob [4].

Заключение. Разработанный веб-комплекс обеспечивает эффективное подавление маскирующих акустических помех при минимальных фазовых искажениях речи. Помимо экспертно-прикладных задач, инструмент обладает дидактическим потенциалом для курсов общей физики инженерных вузов: он может использоваться в качестве интерактивного стенда при изучении тем «Суперпозиция волн», «Фурье-анализ» и «Акустический резонанс».

Список литературы

1. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов / И. С. Гоноровский. – Москва: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов / А. Б. Сергиенко. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2006. – 751 с. – ISBN 5-94723-286-X.
3. Web Audio API: W3C Recommendation 18 June 2021 / W3C. – 2021. – URL: https://www.w3.org/TR/webaudio/ (дата обращения: 20.05.2025). – Текст: электронный.
4. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер; пер. с англ. – 3-е изд. – Москва: Техносфера, 2012. – 1048 с. – ISBN 978-5-94836-328-8.

УДК 621.396.96

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА НАДЁЖНОСТЬ UHF RFID В АСНИ

Колесник Е.В., ORCID 0000-0003-1362-6283,
Данилов В.В., д-р техн. наук, проф., *ORCID* 0009-0002-8974-7268
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
ketrinkilli@yandex.com, ut5iv@mail.ru

Введение. Автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) обеспечивают проведение экспериментов, сбор и обработку

научных данных, управление доступом к образцам, реагентам и оборудованию в физических, химических, биологических и материаловедческих лабораториях [1–3]. Для идентификации образцов, контроля их перемещения и автоматизации инвентаризации в таких системах применяют технологии радиочастотной идентификации (RFID). Спецификой условия эксплуатации АСНИ является наличие массивных металлических элементов экспериментальных установок, высокая плотность компоновки таких установок, электромагнитные поля и необходимость сохранения целостности научных данных [4, 5].

В предыдущей работе авторами были систематизированы уязвимости RFID-систем в промышленных АСУ, в том числе влияние металлических поверхностей, снижающее дальность считывания. Настоящая работа развивает это направление применительно АСНИ.

Цель – разработка методики экспериментального исследования физического канала UHF RFID в условиях, характерных для лабораторных и экспериментальных комплексов.

Постановка задачи. На данном этапе работа находится в стадии подготовки эксперимента. Формулируется методика измерений, определяются контролируемые параметры (RSSI, пороговая мощность считывания P_{th}), выбрана конфигурация стенда на базе модуля YRM100 (UHF, 865–868 МГц) и пассивных меток NXP UCODE8 и Alien H3. Цель эксперимента – получить количественные зависимости уровня принимаемого сигнала и пороговой мощности считывания от расстояния между антенной ридера и меткой, а также от наличия и положения металлического отражателя, имитирующего элементы научного оборудования.

Теоретические предпосылки. Простейшая двухлучевая модель предсказывает немонотонность принимаемой мощности за счёт сложения прямого и отражённого сигналов. Для частоты 866 МГц длина волны составляет $\lambda = c/f \approx 0{,}346$ м, а разность хода, соответствующая интерференционному максимуму, достигается при изменении расстояния примерно на $\lambda/2 \approx 17$ см. Это означает, что при перемещении метки вдоль нормали к металлической поверхности следует ожидать чередования зон уверенного и неуверенного считывания. В ближней зоне (до 1–2 м) классическая модель Фрииса неприменима, и требуется учёт сферического характера волны, что подтверждает актуальность экспериментальных данных для АСНИ, где расстояния между метками и считывателями часто составляют десятки сантиметров.

Методика планируемого эксперимента. Планируется провести серию измерений в свободном пространстве с металлическим отражателем. Метка размещается на пенопластовой подложке, расстояние до антенны ридера варьируется от 0,1 до 1,5 м с шагом 0,1 м. Металлический лист размером 20×20 см вводится на фиксированных

расстояниях от метки (5, 10, 15 см) под углами 90° и 45° к плоскости антенны. Для каждой конфигурации планируется выполнить не менее 10 считываний с фиксацией среднего RSSI и минимальной мощности считывания P_{th}.

Стенд предполагается собрать на базе модуля YRM100, подключаемого к микроконтроллеру ESP32 через интерфейс UART (TTL, 3,3 В). Питание модуля осуществляется от внешнего источника 5 В с потребляемым током до 260 мА. Управление режимами считывания и регистрация данных выполняются посредством специально разрабатываемого программного обеспечения.

В качестве исследуемых образцов выбраны пассивные UHF-метки NXP UCODE8 (100×50 мм, чувствительность чипа −23 dBm) и карты Alien H3 (PVC, 860–960 МГц). Выбор обусловлен следующими причинами.

Во-первых, обе метки относятся к стандарту EPC Class 1 Gen 2 / ISO 18000-6C, что обеспечивает совместимость с выбранным считывателем YRM100 и корректность сравнения результатов. Во-вторых, они различаются площадью антенн: UCODE8 имеет антенну 46×46 мм, тогда как карта H3 – меньшую по площади антенну, интегрированную в корпус 86×54 мм. Это позволяет в одном эксперименте оценить влияние геометрии антенны метки на устойчивость к переотражениям, что является одним из ключевых факторов для АСНИ. Также важно, что UCODE8 обладает пониженным порогом активации (−23 dBm), что делает её более чувствительной к слабым сигналам и, предположительно, более уязвимой к деструктивной интерференции. Так как карта H3, напротив, имеет более высокий порог, но большую помехоустойчивость за счёт конструктивных особенностей. Сравнение этих двух типов меток позволит сформулировать практические рекомендации по выбору маркировки для конкретных условий лаборатории.

Ожидаемые результаты. Ожидается, что в свободном пространстве зависимость RSSI от расстояния будет монотонно убывать. При внесении металлического отражателя предполагается немонотонный характер зависимости – чередование максимумов и минимумов, обусловленное интерференцией прямого и отражённого лучей. Оценочно период интерференционных максимумов при 866 МГц составит около 17 см. Также ожидается, что метка UCODE8 с большей антенной будет менее чувствительна к переотражениям, чем карта H3.

Полученные данные предполагается использовать для верификации аналитических моделей ближнего поля и разработки практических рекомендаций по размещению антенн и выбору меток в автоматизированных системах научных исследований, работающих в условиях плотной металлической оснастки.

Заключение. Разработана методика экспериментального исследования влияния металлических поверхностей на надёжность UHF RFID в

АСНИ. Результаты могут быть использованы для повышения отказоустойчивости RFID-систем в лабораторных и экспериментальных комплексах.

Список литературы

1. Махов, С. М. Интеграция блокчейн-технологий и умной упаковки в цепочку поставок пищевой промышленности / С. М. Махов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – № 7-2(106). – С. 242-246. – DOI 10.24412/2500-1000-2025-7-2-242-246. – EDN WZMFDL.
2. Третьяков И. А. Компоненты автоматизированной системы научных исследований радиоканалов ПЭМИН / И. А. Третьяков, А. С. Куликова, Н. В. Долбещенкова и др. // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 94-100. – DOI 10.5281/zenodo.15586055. – EDN OAXXSW.
3. Соловьев, А. М. О результатах разработки автоматизированной системы научных исследований средств мониторинга радиоэлектронной обстановки в АСУТП / А. М. Соловьев, А. А. Головин, Р. К. Кинденов // Технические науки – от теории к практике. – 2015. – № 53. – С. 80-88. – EDN VDWRPV.
4. Бельский В. С. Безопасность RFID-систем / В. С. Бельский, Е. С. Грибоедова, К. Д. Царегородцев, А. А. Чичаева // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9, № 9. – С. 1-20. – EDN URSLEN.
5. Волошина, Н. В. Алгоритм обнаружения RFID-дубликатов / Н. В. Волошина, А. А. Лавринович // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 67-73. – DOI 10.17586/2226-1494-2022-22-1-67-73. – EDN DRYIWU.
6. ГОСТ ISO/IEC 15963-1-2021. Информационные технологии. Идентификация радиочастотная для управления предметами. Часть 1. Системы нумерации для уникальной идентификации радиочастотных меток. – М.: Стандартинформ, 2021. – URL: https://files.stroyinf.ru/Data/755/75588.pdf (дата обращения: 08.10.2026).

УДК 004.056.55

ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПОИСКА СООБЩЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ШИФРОВАНИЯ

Колесников А.Е., ORCID 0009-0001-8598-6547
ФГБНУ «Институт научно-технической информации», г. Донецк, РФ
lepy0ha@yandex.ru

Введение. В ходе разработки микросервиса обмена сообщениями научной платформы [1] принято решение хранить текст переписки в зашифрованном виде, что обеспечивает защиту персональных данных при утечке базы данных или её копий [2]. Вместе с тем шифрование затрудняет поиск: из-за случайного вектора инициализации одинаковые сообщения преобразуются в различные шифротексты, и запрос с оператором ILIKE по зашифрованному столбцу не возвращает результатов. Способ поиска

определяется методом шифрования, поэтому его тип выбран по результатам сравнительного анализа.

Цель работы – провести анализ скорости поиска сообщений при различных методах шифрования текста и выбрать тип, в котором быстродействие достигается не в ущерб безопасности.

Основная часть. Рассмотрено восемь вариантов хранения текста: открытый текст; шифрование на стороне приложения алгоритмами AES-256-CBC с кодом аутентификации HMAC-SHA-256 [3] и AES-256-GCM [5] в формате шифровальщика Laravel [4], алгоритмами AES-256-GCM и ChaCha20-Poly1305 в компактном формате; шифрование средствами СУБД с расшифровкой функциями decrypt_iv и pgp_sym_decrypt расширения pgcrypto [6]; слепой индекс.

Открытый текст принят в качестве базового варианта, поиск в нём выполняется оператором ILIKE. При шифровании на стороне приложения ключ не передаётся серверу базы данных; при поиске извлекается не более 5000 последних сообщений чата, которые расшифровываются и сопоставляются со словами запроса. Формат Laravel представляет собой структуру JSON с двойным кодированием Base64, компактный формат – одну строку Base64. При шифровании средствами СУБД расшифровка производится в запросе: функцией decrypt_iv с алгоритмом AES-256-CBC либо функцией pgp_sym_decrypt по схеме OpenPGP. При использовании слепого индекса для каждого слова сообщения в отдельной таблице хранится код HMAC-SHA-256, по которому выполняется поиск, а расшифровываются только найденные сообщения. Схемы поиска по зашифрованным данным также рассчитаны на точное совпадение слов [7].

Измерения выполнены на стенде (AMD Ryzen 7 5800HS, 16 ГБ, PHP 8.5, OpenSSL 3.5, PostgreSQL 18.1) без параллельного выполнения запросов. Поиск измерен в чатах из 1000 и 5000 сообщений средней длиной 173 знака, расшифровка – отдельно, на одном сообщении в 200 знаков. В таблице 1 приведены медианы 75 прогонов (для функции pgp_sym_decrypt – 25); медианы пяти серий отличаются от общей не более чем на 29 %.

Таблица

Длина хранимого текста и время поиска в чатах из 1000 и 5000 сообщений

Вариант	**Длина, раз**	**Расшифровка, мкс**	**Поиск в 1000, мс**	**Поиск в 5000, мс**
Открытый текст, оператор ILIKE	1,00	–	12,2	48,3
Laravel, AES-256-CBC и HMAC	2,35	8,7	22,2	153
Laravel, AES-256-GCM	2,11	7,2	20,4	123
Компактный, AES-256-GCM	1,46	2,4	15,4	83,4
Компактный, ChaCha20-Poly1305	1,45	2,5	15,8	82,9
pgcrypto, функция decrypt_iv	1,45	–	10,6	41,3
pgcrypto, функция pgp_sym_decrypt	1,63	–	631	3190
Слепой индекс	7,07	–	3,1	2,9

При одинаковом формате выбор алгоритма незначительно влияет на быстродействие (от 1 до 19 %). Существенно большее влияние оказывает формат хранения шифротекста: расшифровка сообщения занимает 8,7 мкс в формате Laravel и 2,4 мкс в компактном формате. Поиск по 5000 сообщений в формате Laravel с AES-256-CBC медленнее поиска по открытому тексту в 3,2 раза, в компактном формате с AES-256-GCM – в 1,7 раза, а длина текста возрастает в 2,35 и 1,46 раза соответственно.

Варианты с шифрованием средствами СУБД различаются по времени поиска в 77 раз. Функция decrypt_iv не уступает поиску по открытому тексту, тогда как функция pgp_sym_decrypt затрачивает на 5000 сообщений 3 секунды, поскольку для каждого значения заново вырабатывает ключ из пароля [6]. Общий недостаток обоих вариантов – передача ключа серверу базы данных в каждом запросе; кроме того, функция decrypt_iv не контролирует целостность [6].

Наименьшее время поиска обеспечивает слепой индекс: 2,9 мс независимо от длины чата. Однако индексная таблица для 6000 сообщений содержит 118 тысяч кодов и занимает 11 МБ, что в 5,6 раза превышает размер открытого текста. Одинаковым словам соответствуют одинаковые коды, что раскрывает частоту слов.

По результатам сравнения для сервиса выбран алгоритм AES-256-GCM в компактном формате. Шифрование средствами СУБД отклонено, поскольку ключ должен оставаться в приложении, слепой индекс – поскольку он не обеспечивает поиск по вхождению подстроки, применяемый в сервисе. Компактный формат обеспечивает поиск в 1,8 раза быстрее формата Laravel и сокращает длину шифротекста в 1,6 раза. Защищённость при этом не снижается: в реализации идентификатор сообщения включён в дополнительные аутентифицируемые данные режима GCM [5], поэтому шифротекст, перенесённый в другую запись, не расшифровывается. Ограничения решения – собственная реализация формата и предел режима GCM: не более 2^{32} операций шифрования на одном ключе [5].

Заключение. В результате анализа установлено, что при шифровании на стороне приложения скорость поиска определяется не алгоритмом, а форматом хранения шифротекста: компактный формат ускоряет поиск в 1,8 раза и сокращает длину шифротекста в 1,6 раза. Шифрование средствами СУБД требует передачи ключа серверу базы данных, а слепой индекс раскрывает частоту слов. Для микросервиса обмена сообщениями выбрано и реализовано шифрование AES-256-GCM в компактном формате с привязкой шифротекста к идентификатору сообщения, обеспечивающее быстродействие без снижения защищённости.

Информация о финансовой поддержке: *Исследования проводились в рамках государственного задания «Разработка концепции формирования региональных экосистем развития научного творчества и культуры работы с РИД среди молодёжи на примере отдельных территорий» (номер госрегистрации № 1023110900132-5-5.2.4).*

Список литературы

1. Колесников, А. Е. Архитектура изолированного микросервиса обмена сообщениями в реальном времени / А. Е. Колесников // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2026): сб. материалов XVII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Донецк, 22–23 апреля 2026 г.). – Донецк: ДонНТУ, 2026. – С. 215–220. – EDN YWWWGR.
2. Бондарчук, С. С. Технология защиты персональных данных с использованием СУБД Oracle / С. С. Бондарчук, А. Л. Додохов, А. Г. Сабанов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – № 4 (152). – С. 36–40.
3. Рябко, Б. Я. Криптографические методы защиты информации: учеб. пособие для вузов / Б. Я. Рябко, А. Н. Фионов. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2005. – 229 с. – ISBN 5-93517-265-8.
4. Encryption. – Текст: электронный // Laravel 13.x: документация. – URL: https://laravel.com/docs/13.x/encryption (дата обращения: 07.10.2026).
5. Dworkin, M. Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC: NIST Special Publication 800-38D / M. Dworkin. – Gaithersburg : NIST, 2007. – DOI 10.6028/NIST.SP.800-38D.
6. pgcrypto – функции защитного преобразования. – Текст: электронный // PostgreSQL 18: документация / Postgres Professional. – URL: https://postgrespro.ru/docs/postgresql/18/pgcrypto (дата обращения: 07.10.2026).
7. Жаринов, Р. Ф. Исследование методов и средств решения задачи поиска вхождения символов в зашифрованные данные / Р. Ф. Жаринов // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 2 (32). – С. 71–76.

УДК 621.37

АКТУАЛЬНОСТЬ АЛГОРИТМА MUSIC В СОВРЕМЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ КОММУНИКАЦИЯХ

Кузнецов А.А., ORCID 0009-0006-6790-2043,
Козлов С.В., д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4564-0883
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
kuznetsovarta@stud.kai.ru, svkozlov@kai.ru

Введение. В данной работе уделяется внимание проблеме актуальности алгоритма MUSIC для определения направления прихода радиоволны. В статье представлен краткий обзор метода и его история, математическая модель, а также приведены примеры подходов к его реализации в современных системах телекоммуникаций.

Основная часть. Множество инженерных приложений теории радиолокации включает в себя, в первую очередь, проблему определения направления прихода электромагнитной волны (DoA, direction of arrival). Такую задачу решают при пеленге самолётов, военной техники или

источников помех, при реализации систем интернета вещей, радионавигации и пр. Базовые способы определения DoA (MVDR и beamforming) остаются актуальными в определённых ситуациях, меж тем с 80-х годов XX века особое внимание уделяется подпространственным методам. Они привлекательны с точки зрения помехоустойчивости и высокого разрешения, которых можно достичь с их использованием. В данной работе мы остановимся на рассмотрении алгоритма MUSIC как на пионере подпространственных методов.

MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) – алгоритм сверхразрешения для задач одно- и двухмерной пеленгации. Был представлен Шмидтом в 1982 году [1]. С математической точки зрения основывается на собственном разложении (EVD, eigenvalue decomposition) ковариационной матрицы зашумлённого сигнала, снятого приёмной антенной, и построении псевдоспектра с использованием полученного таким образом сигнального подпространства.

Рассмотрим модель принятого сигнала X размерности $(M \times n)$:

$$X = A \cdot S + N$$

где S – матрица сигнала без шумов размерности $(K \times n)$; A – матрица направляющих векторов размерности $(M \times K)$; N – матрица некоррелированного аддитивного белого Гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma_{\theta_i}^2$ размерности $(M \times n)$; M – количество сенсоров линейной эквидистантной антенной решётки (ЛАР), K – количество источников сигнала, n – количество принятых сэмплов.

Ковариационная матрица сигнала, таким образом, будет получена как

$$R_X = X \cdot X^H = R_S + R_N$$

После EVD разделим получившуюся матрицу U собственных векторов на шумовое и сигнальное подпространства, причём в последнее возьмём K собственных векторов, соответствующих наибольшим собственным значениям:

$$U = \left[u_{\lambda_1^X}, u_{\lambda_2^X}, \dots, u_{\lambda_M^X}\right] = [U_N, U_S]$$

Итеративно вычисляя следующее выражение, где $a(\theta_i)$ – матрица направляющих векторов для каждого возможного угла падения волны, получаем псевдоспектр:

$$P_{MUSIC}(\theta_i) = \frac{1}{\left|a(\theta_i)^H \cdot U_N \cdot U_N{}^H \cdot a(\theta_i)\right|}$$

Пики $P_{MUSIC}(\theta)$ и являются оценкой DoA.

MUSIC экстенсивно изучался на протяжении последних десятилетий. Множество работ посвящено изучению его возможностей и ограничений, сравнению с другими, в том числе подпространственными, методами [2-3].

Алгоритм также активно реализуется на кольцевых антенных решётках (КАР), которые являются альтернативой плоскостным при решении задач двухмерной пеленгации (2D-MUSIC). Кроме того, некоторые модернизации с использованием КАР позволяют существенно улучшать разрешающую способность метода [4].

Ввиду привлекательных характеристик, MUSIC часто реализуется на ПЛИС (программируемых логических интегральных схемах), где становится возможным серьёзно снизить затраты вычислительных ресурсов. Сочетание оптимизированной hardware-реализации и вычислений в режиме чисел с фиксированной точкой позволяет добиться задержек на полное определение DoA порядка единиц-десятков микросекунд [5].

Несмотря на то, что алгоритм нельзя назвать новым, он всё ещё активно применяется в современных телекоммуникациях. MUSIC используется как необходимый шаг первичной обработки принятого сигнала в гибридных beamforming системах для умных антенн [6]. В [7] представлен комплексный обзор систем обнаружения постановщиков помех для систем пятого поколения (5G); авторы демонстрируют реализацию системы с использованием 2D-MUSIC на основе кумулянтов четвёртого порядка. В [8] упоминается использование алгоритма в качестве одного из элементов beamforming-системы терагерцового диапазона в ближнем поле. Подобные разработки актуальны в разрезе проектирования будущих систем связи шестого поколения.

Заключение. Проведённый в рамках статьи анализ современных наработок в области беспроводных коммуникаций подтвердил, что подпространственный подход к решению задачи определения DoA, в частности с помощью алгоритма MUSIC, остаётся актуальным с учётом текущих и будущих разработок.

Список литературы

1. Schmidt, R. A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation. [Текст]: дис… канд. техн. наук / R. O. Schmidt – Stanford: Stanford University, 1982. – 201 с.
2. Zhou, C. A resolution measure for the MUSIC algorithm and its application to plane wave arrivals contaminated by coherent interference / C. Zhou, F. Haber, D. Jaggard // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1991. – Т. 39, № 2 – С. 454-463. – doi: 10.1109/78.80829.
3. Lekhana, M. Performance Comparison of Music, Root-Music, And Esprit Algorithms for DOA Estimation Under Rayleigh Fading Channels / M. Lekhana, K. Lingaraj // International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH). – 2025. – Т. 3, № 9 – С. 3826-3835. – doi: 10.47392/IRJAEH.2025.0556.
4. Morikawa, Y. DOA Estimation with Uniform Circular Array Using Gauss-Newton Method Based on MUSIC and MODE Algorithms / Y. Morikawa, N. Kikuma, K. Sakakibara [et al.] // Proceedings of ISAP. – 2005. – Т. 3, № 6 – С. 317-320.

5. Huang, K. An Efficient FPGA Implementation for 2-D MUSIC Algorithm / K. Huang, J. Sha, W. Shi [et al.] // Circuits Systems and Signal Processing. – 2015. – Т. 35, № 5 – doi: 10.1007/s00034-015-0144-z.
6. Agwu, O. A Review on Techniquesand Approaches for Optimal Performance in Adaptive Beamforming Smart Antennas / O. Agwu, C. Amadi, D. Kanu // Journal of Materials Engineering, Structures and Computation. – 2025. – Т. 4, № 3 – С. 29–40. – doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.16739140.
7. Kulhandjian, M. A Comprehensive Survey on Jammer Detection and Localization in 5G Networks with Higher-Order Statistics and Unsupervised Learning / M. Kulhandjian, H. Kulhandjian // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2026. – Т. 36, № 1 – С. 175-192. – doi: https://doi.org/10.1134/S105466182570142.
8. Morelli, M. Channel Estimation for 6G Near-Field Wireless Communications: A Comprehensive Survey / M. Morelli M. // arXiv. – URL: https://arxiv.org/abs/2507.23526.

УДК 621.37

ОБ АКТУАЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА ESPRIT В СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ

Кузнецов А.А., ORCID 0009-0006-6790-2043,
Козлов С.В., д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4564-0883
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
kuznetsovarta@stud.kai.ru, svkozlov@kai.ru

Введение. В данной статье рассмотрена проблема актуальности алгоритма ESPRIT для определения направления прихода радиоволны и смежных задач. В работе представлен краткий обзор метода и его история, математическая модель, описаны качественные отличия от других подпространственных методов, а также приведены примеры подходов к его имплементации в текущих и будущих разработках систем телекоммуникаций.

Основная часть. В контексте имплементации радиосистем связи, навигации и локации особое внимание уделяется решению задачи определения направления прихода электромагнитной волны (DoA, direction of arrival). Это актуально в разрезе достижения цели оптимального формирования луча в антенных MIMO-системах, определения координат интересующих нас объектов, иногда – ряда характеристик узкополосных сигналов. Подпространственные методы нахождения DoA на протяжении долгого времени являются одними из частоиспользуемых при решении подобных задач, что обусловлено рядом исключительных характеристик таких техник, а именно их высокой разрешающей способностью в случаях работы с несколькими источниками сигналов одновременно, точностью

определения координат и устойчивостью функционирования при сильном шумовом фоне. Алгоритм ESPRIT – более поздняя разработка по сравнению с MUSIC, давшим начало подпространственным методам. В рамках данной работы мы рассмотрим актуальность этого метода для текущих и перспективных разработок в области телекоммуникаций.

ESPRIT (Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques) был разработан в 1985 году [1], изначально – для решения задач определения параметров зашумлённых синусоид. Несмотря на это, алгоритм быстро стал известен как предпочтительный метод оценки DoA. За счёт несколько иного подхода к формированию и/или рассмотрению антенной решётки (АР), ESPRIT способен использовать вращательную инвариантность сигнального подпространства для определения DoA, что в общем случае даёт выигрыш в быстродействии и устойчивости перед MUSIC и его модернизациями.

Рассмотрим M-элементную линейную АР и составим из неё две АР путём выбора элементов с 1-го по M-1 в качестве одной и со 2-го по M в качестве другой. Тогда модель принятого сигнала X примет вид

$$X = \begin{bmatrix} X_x \\ X_y \end{bmatrix}$$

где

$$X_x = A_x \cdot S + N$$
$$X_y = A_x \cdot \Phi \cdot S + N$$

и где Φ – диагональная матрица вращения. Она содержит информацию о фазовых набегах двух подрешёток, которую мы хотим извлечь.

Ковариационная матрица сигнала будет получена как

$$R_X = X \cdot X^H$$

После EVD разделим получившуюся матрицу U собственных векторов на шумовое и сигнальное подпространства, причём в последнее возьмём K собственных векторов, соответствующих наибольшим собственным значениям (K – число источников сигнала):

$$U = \left[u_{\lambda_1^X}, u_{\lambda_2^X}, \dots, u_{\lambda_M^X}\right] = [U_N, U_S]$$

Далее, разобьем U_S на два массива из первых и последних M-1 строк соответственно; назовем их U_1 и U_2. Существует однозначная связь между сигнальным подпространством и массивом направляющих векторов A. Выразим её через матрицу T. Она невырожденная, следовательно, обратимая, тогда:

$$U_S = A \cdot T$$
$$U_1 = A_x \cdot T$$
$$U_2 = A_y \cdot T = A_x \cdot \Phi \cdot T$$
$$U_2 = U_1 \cdot T^{-1} \cdot \Phi \cdot T$$
$$U_2 = U_1 \cdot \Psi$$

где

$$\Psi = T^{-1} \cdot \Phi \cdot T$$

Собственные значения Ψ идентичны диагональным элементам Φ, тогда после EVD матрицы Ψ мы можем оценить DoA:

$$\theta_i = \arcsin(-\frac{\lambda}{2\pi d} \operatorname{Im}\{\lambda_i^{\Psi}\})$$

Кроме традиционного применения в качестве лишь оценщика DoA, на сегодняшний день ESPRIT находит себе место как часть более комплексных разработок. В [2] анализируется производительность двухмерной реализации алгоритма в сверхплотных сетях пятого поколения (5G). В [3] ESPRIT лежит в основе совместного дискриминатора задержки и фазы для нахождения абонента в нисходящем канале систем 5G NR (5G new radio). После исследования переоценки порядка канала методом MDL (minimum descriptive length) представлен новый критерий оценки направления, основанный на SNR (signal-to-noise ratio). В [4] эта разработка используется для определения ToA (time of arrival, время прихода) многолучевых фрагментов волны в 5G NR. Симуляции подтвердили преимущество этого метода перед обычным ESPRIT и DLL (delay-locked loop, система синхронизации по задержке). Применение алгоритма в рамках системы трёхмерной пеленгации в ближнем поле для системы шестого поколения в [5] подтверждает ценность ESPRIT также и как неотъемлемого элемента передовых систем коммуникации будущего.

Заключение. Проведённый в рамках работы анализ текущих наработок в области телекоммуникаций пятого и шестого поколения подтвердил, что алгоритм ESPRIT, как один из ключевых методов определения DoA и параметров сигналов, остаётся актуальным в контексте существующих и будущих разработок.

Список литературы

1. Paulraj, A. Estimation Of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques – Esprit / A. Paulraj, R. Roy, T. Kailath // Nineteeth Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers. – 1985. – С. 83-89. – doi: 10.1109/ACSSC.1985.671426.
2. Fokin, G. Performance Analysis of the 2D-Unitary ESPRIT Algorithm for 5G mmWave networks / G. Fokin, I. Grishin, A. Sinilnikov [et al.] // 2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2024. – С. 1-5. – doi: 10.1109/WECONF61770.2024.10564641.
3. Lapin, I. Joint delay and phase discriminator based on esprit for 5G NR positioning / I. Lapin, G. Seco-Granados, O. Renaudin [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Т. 9 – С. 126550-126563. – doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111759.
4. Gao, X. Signal Parameter Estimation Based on ESPRIT With State Space Model for 5G NR Signals in Indoor and Urban Environments / X. Gao, D. He, P. Wang [et al.] // IEEE Transactions On Vehicular Technology. – 2025. – Т. 74. – № 2. – С. 2276-2291. – doi: 10.1109/TVT.2024.3470332.
5. Miao, H. Multiple Near-field User 3D Localization for Extremely Large Scale UPA / H. Miao, M. Peng // 2025 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). – 2025. – С. 745-750. – doi: 10.1109/ICCWorkshops67674.2025.11162418.

УДК 004.056

ВЫБОРОЧНОЕ СТРУКТУРНОЕ УТОЧНЕНИЕ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ МАССИВОВ БИНАРНЫХ ДАННЫХ В ИСХОДНЫХ ТЕКСТАХ ПРОГРАММ

Мельников В.А., ORCID 0009-0001-2881-8651
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», г. Москва, РФ
melnikov.va@gubkin.ru

Введение. Поиск бинарных вставок в исходных текстах необходим для последующего исследования содержимого, которое может быть представлено как обычные данные [1]. Массивы бинарных данных (МБД) встречаются в числовых и строковых инициализаторах; их наличие не доказывает вредоносность. При обработке больших проектов требуется сочетать охват конструкций со скоростью анализа. Подходы к выбору аналитических средств, аудиту конфигурации и сочетанию методов выявления деструктивных событий рассмотрены в работах [2–4]. В настоящем исследовании эти направления дополняются локализацией встроенных объектов.

Цель. Разработать и предварительно оценить выборочное структурное уточнение лексико-структурного поиска массивов бинарных данных (ЛСП-МБД) для исходников C/C++.

Основная часть. Разделение синтаксического представления и детекторов упрощает организацию анализа [5]; структурное сопоставление расширяет возможности поиска по сравнению с обработкой строк [6]. Предлагается сначала выполнять лексический проход, различающий код, комментарии и литералы, а затем уточнять только файлы с признаками сложных инициализаторов. Конкретное синтаксическое дерево (CST, Concrete Syntax Tree) сохраняет структуру и исходные координаты узлов [7]. В прототипе применяется Tree-sitter.

Лексический проход регистрирует диапазоны, вид конструкции и диагностику. Признаками запуска уточнения служат составные литералы, сложная форма объявления, директивы внутри инициализатора и неразрешенные элементы. Эти признаки выбирают файлы, но сами не подтверждают МБД. Уточняющий проход выделяет структурно поддержанные диапазоны; конфликтующие результаты и ошибки разбора сохраняются для дальнейшего разрешения. Первичные свидетельства не удаляются безусловно.

Например, составной литерал (unsigned char[]){1,2,3} содержит данные вне обычной формы объявления массива. Его структура требует отдельного правила извлечения. Напротив, фигурные скобки в комментарии не должны создавать самостоятельный объект. Поиск

сначала устанавливает лексический контекст, затем проверяет родительские узлы выбранной конструкции. Это разделяет признаки запуска разбора и основания включения результата. Координаты уточненного диапазона сохраняются в исходном файле для последующей проверки и канонизации.

Пусть F – набор файлов, S ⊆ F – выбранные для уточнения файлы. Затраты процедуры описываются выражением.

$$T_{sel} = T_{lex} + \sum_{f \in S} T_{cst(f)} + T_{merge},$$

Здесь T_lex – время первичного прохода; T_cst(f) – время уточнения файла; T_merge – объединение свидетельств. Формула (1) показывает возможную экономию относительно разбора всех файлов, но не гарантирует ее: накладные расходы и ошибки выбора необходимо измерять. Качество отбора оценивается по сохранению дополнительных диапазонов полного уточнения, а не только по доле обработанных файлов.

Проверка выполнена на фиксированной выборке из 512 файлов C/H Linux 7.2.4. Сохранены 3495 первичных записей и выделены 115 дополнительных диапазонов. Выборочный режим уточнил 131 файл (25.6 %) и сохранил все 115 дополнительных диапазонов полного режима на этой выборке. Медианное время трех раундов на одинаковых входных байтах составило 0.126 с для исходного ЛСП-МБД, 1.939 с для полного и 1.313 с для выборочного уточнения. Чтение файлов и инициализация исключены одинаково. Экономия относительно полного режима – 32.3 %; исходный лексический проход остается быстрее.

На диагностическом наборе из 21 целевого диапазона структурное уточнение точно локализовало 21 вместо 15 у исходного прототипа. Политика отбора дорабатывалась на просмотренной выборке, независимой семантической разметки корпуса нет. Поэтому дополнительные диапазоны не считаются подтвержденными МБД, а результаты не являются оценкой общей полноты обнаружения. Сравнивались собственные варианты; опыт не воспроизводит оригинальный комплекс из работы [1].

Сохранность первичных записей также не подтверждает их правильность: среди свидетельств могут оставаться неоднозначные конструкции. Независимая проверка должна различать верную локализацию, лишние диапазоны и нерешенные случаи. Для настройки и контроля следует использовать разные проекты, сохраняя связанные варианты одного примера в одной части разбиения. Политика, пропускающая трудные файлы, не может считаться ускорением при сопоставимом охвате. Затраты на канонизацию и последующую экспертную проверку необходимо оценивать отдельно.

Заключение. Выборочное уточнение на исследованной выборке сохранило расширенный синтаксический охват полного режима при меньших временных затратах. Практический результат – обоснованная

организация уточняющего этапа ЛСП-МБД с сохранением свидетельств. Следующий шаг – независимая разметка и оценка пропусков, ложных находок, времени и затрат эксперта до канонизации и идентификации.

Список литературы

1. Ерёменко, В. Т. Метод автоматизации поиска бинарных вставок в исходных текстах программного обеспечения / В. Т. Ерёменко, В. В. Рябоконь // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 5(79). – С. 90–94. – URL: https://library.oreluniver.ru/polnotekst/IzvestiyaOrelGTU/ISiT_2013_5.pdf (дата обращения: 08.10.2026).
2. Мельников, В. А. Анализ применимости открытых инструментов работы с алгоритмами Data Mining для решения задач анализа экономических данных / В. А. Мельников, А. А. Першина, Н. А. Савченко // Актуальные проблемы нефти и газа: сборник трудов VII Всероссийской молодежной научной конференции, Москва, 16–18 октября 2024 года. – Москва: Институт проблем нефти и газа РАН, 2024. – С. 360–361. – EDN UIKEBJ. – URL: https://www.ipng.ru/about/council-young-scientists/conference/2024_Youth_Conference_OGRI_RAS.pdf#page=361 (дата обращения: 08.10.2026).
3. Мельников, В. А. Инструменты для аудита безопасности на ALT Linux на примере Lynis / В. А. Мельников, А. А. Першина // Глобальные научные тренды: междисциплинарные исследования: сборник статей II Международной научно-практической конференции, Саратов, 25 марта 2025 года. Часть 1. – Саратов: ООО Издательство «Кубик», 2025. – С. 90–102. – EDN DBAKYT. – URL: https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=1236818 (дата обращения: 08.10.2026).
4. Мельников, В. А. Подходы к выявлению деструктивных действий и событий в информационных системах / В. А. Мельников, П. Ю. Пушкин, А. А. и др. // Системы высокой доступности. – 2026. – Т. 22, № 3. – С. 112–125. – DOI 10.18127/j20729472-202603-10. – URL: https://radiotec.ru/ru/journal/Highly_available_systems/number/2026-3/article/26308 (дата обращения: 08.10.2026).
5. Афанасьев, В. О. Статический анализ на основе обобщенного абстрактного синтаксического дерева / В. О. Афанасьев, А. Е. Бородин, К. И. Вихлянцев и др. // Труды Института системного программирования РАН. – 2023. – Т. 35, вып. 6. – С. 103–120. – DOI 10.15514/ISPRAS-2023-35(6)-6. – URL: https://www.ispras.ru/proceedings/docs/2023/35/6/isp_35_2023_6_103.pdf (дата обращения: 08.10.2026).
6. Matute, G. Syntactic Code Search with Sequence-to-Tree Matching: Supporting Syntactic Search with Incomplete Code Fragments / G. Matute, W. Ni, T. Barik, A. Cheung [et al.] // Proceedings of the ACM on Programming Languages. – 2024. – Vol. 8, PLDI. – DOI 10.1145/3656460. – URL: https://machinelearning.apple.com/research/sequence-to-tree (дата обращения: 08.10.2026).
7. Tree-sitter. Basic Parsing: официальная документация. – URL: https://tree-sitter.github.io/tree-sitter/using-parsers/2-basic-parsing.html (дата обращения: 08.10.2026).

УДК 004.056

УСЛОВИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЧНО НАБЛЮДАЕМЫХ МАССИВОВ БИНАРНЫХ ДАННЫХ

Мельников В.А., ORCID 0009-0001-2881-8651
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», г. Москва, РФ
melnikov.va@gubkin.ru

Введение. При анализе безопасности программного обеспечения массивы бинарных данных (МБД) сопоставляются с эталонными объектами для установления их происхождения. Идентификация может использовать минимальные хэш-значения блоков данных [1]; качество сопоставления исследуется экспериментально [2]. Однако часть байтов извлечённого массива может оставаться неизвестной из-за макросов, конфигурации сборки или внешних включений.

Цель. Определить условия принятия решения при такой неполноте наблюдений.

Основная часть. Предлагается разделять объём восстановленных данных, сходство наблюдаемой части и различимость эталонов. Модель включает значения байтов и маску известности. Неизвестный байт не подменяется нулём: достоверное значение 0x00 участвует в сравнении на общих основаниях. Если размер неразрешённого фрагмента неизвестен, последовательность разделяется на наблюдаемые части без искусственного соединения байтов по разные стороны разрыва.

При известной длине массива число допустимых позиционных окон определяется выражением

$$N_w(m) = \sum_{i=1}^{n-w+1} \prod_{j=0}^{w-1} m_{i+j}, \quad 1 \le w \le n,$$

где n – длина массива; w – длина окна; m_i равно 1 для достоверно восстановленного байта в позиции i и 0 для неизвестного; m – вектор этих значений. Произведение равно 1 только для полностью известного окна. При отсутствии допустимых окон сравнение по выбранному масштабу не выполняется. Число окон характеризует объём наблюдений, но не их статистическую независимость.

Расположение пропусков влияет на результат даже при одинаковой доле известных байтов. Например, в массиве длиной 16 байт известны восемь позиций. Если они образуют непрерывный префикс, для окна длиной четыре байта доступны пять позиций сравнения. Если известные и неизвестные байты чередуются, допустимых окон такой длины нет. В обоих случаях восстановлена половина массива, однако объём пригодных для сопоставления наблюдений различается. Поэтому долю известных

байтов необходимо рассматривать совместно с их расположением и выбранной длиной окна.

Вычисление по формуле (1) не требует повторного перемножения всех значений маски в каждом окне. Достаточно поддерживать число неизвестных позиций: при сдвиге окна исключать вклад уходящей позиции и добавлять вклад входящей. Окно учитывается, если это число равно нулю. Для фиксированной длины окна такой подсчёт требует линейного прохода по маске и постоянного числа дополнительных счётчиков. Эта оценка относится к подсчёту допустимых окон; затраты на сопоставление с эталонной базой оцениваются отдельно.

Рассмотрим два эталона длиной 256 байт с общим префиксом 128 байт и различными вторыми половинами. У исследуемого массива известен только общий префикс. По формуле (1) для окон длиной 4, 8, 16 и 32 байта получаем 125, 121, 113 и 97 допустимых позиций. Все 456 окон совпадают с соответствующими окнами обоих эталонов. Покрытие наблюдений совпадениями равно 100 %, однако однозначный выбор невозможен.

Восстановление байта, различающего эталоны, при фиксированном позиционном сопоставлении может сузить множество совместимых объектов. Дополнительный байт из их общей части этого не обеспечивает. Следовательно, рост числа известных байтов сам по себе не гарантирует однозначной идентификации: существенно наличие различающих свидетельств.

Подходы к выбору инструментов анализа данных по заданным критериям и документированию результатов аудита безопасности рассматриваются в работах [3–5]. Для идентификации МБД предлагается использовать эти принципы при проверке допустимости сравнения и фиксации оснований решения: высокая оценка сходства не должна компенсировать недостаточность наблюдений.

Процедура идентификации последовательно проверяет параметры восстановления, наличие допустимых окон и различимость эталонов. Если представление не определено или пригодных окон нет, фиксируется статус «недостаточно данных». При нескольких совместимых эталонах сохраняется неоднозначность. Единственное соответствие принимается в пределах заданной базы и правил сравнения; отсутствие соответствий означает необходимость дальнейшего исследования объекта, а не доказанную вредоносность.

Ложные предупреждения осложняют практическое использование статического анализа [6]. Поэтому при проверке предлагаемой процедуры необходимо учитывать ошибочные идентификации, правильные решения и долю неопределённых результатов. Размеченные примеры с пропусками в общих и различающих участках позволят установить, когда отказ от однозначного ответа предотвращает ошибку, а когда требуется расширить наблюдения.

Заключение. Результат работы – формализация допустимых окон и порядка принятия решения при частичной наблюдаемости МБД. Формула определяет доступный материал для сравнения, а проверка различимости определяет возможность выбора эталона. Процедура дополняет лексико-структурный поиск массивов бинарных данных на этапе идентификации найденных объектов.

Список литературы

1. Лебеденко, Е. В. Выбор управляемых параметров алгоритма идентификации массивов бинарных данных / Е. В. Лебеденко, В. В. Рябоконь, Ю. Н. Игнатов // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 3(34). – С. 126. – EDN WIRKFH.
2. Экспериментальное исследование метода идентификации массивов бинарных данных / А. Н. Лапко, В. В. Рябоконь, М. А. Куцакин [и др.] // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 47. – EDN ZEIRWN.
3. Мельников, В. А. Анализ применимости открытых инструментов работы с алгоритмами Data Mining для решения задач анализа экономических данных / В. А. Мельников, А. А. Першина, Н. А. Савченко // Актуальные проблемы нефти и газа: Сборник трудов VII Всероссийской молодежной научной конференции, Москва, 16–18 октября 2024 года. – Москва: Институт проблем нефти и газа РАН, 2024. – С. 360-361. – EDN UIKEBJ.
4. Мельников, В. А. Оценка коммерческих инструментов работы с алгоритмами Data Mining / В. А. Мельников, А. А. Першина, Н. А. Савченко // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: Тезисы докладов VIII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию профессора Ю. П. Желтова, Москва, 07–11 октября 2024 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И. М. Губкина, 2024. – С. 434-435. – EDN SJRFEZ.
5. Мельников, В. А. Инструменты для аудита безопасности на ALT Linux на примере Lynis / В. А. Мельников, А. А. Першина // Глобальные научные тренды: междисциплинарные исследования: Сборник статей II Международной научно-практической конференции, Саратов, 25 марта 2025 года. Часть 1. – Саратов: ООО Издательство «Кубик», 2025. – С. 90-102. – EDN DBAKYT.
6. Герасимов, А. Ю. Обзор подходов к улучшению качества результатов статического анализа программ / А. Ю. Герасимов // Труды Института системного программирования РАН. – 2017. – Т. 29, № 3. – С. 75-98. – DOI 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-6. – EDN YUFLVD.

УДК 004.056

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ

Мельникова А.А., ORCID 0009-0009-6360-2432,
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, РФ
melnikovaaa16@mail.ru

Введение. Оценка рисков информационной безопасности (ИБ) необходима организации для определения приоритетов защиты и обоснования затрат. Её практическая ценность зависит от соответствия реальным условиям деятельности. Даже при использовании установленной методики неполные сведения, неоднозначные критерии и устаревшие предположения могут приводить к ошибочным решениям.

Цель работы – систематизация основных проблем оценки рисков ИБ, установление связанных с ними искажений и определение направлений их уменьшения.

Основная часть. В соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010 риск ИБ связан с возможностью причинения ущерба организации вследствие использования угрозой уязвимости актива [1]. Поэтому оценка предполагает установление связи между тем, что нуждается в защите, условиями нарушения безопасности и последствиями для деятельности. Для настоящего исследования проблемы сгруппированы по четырём основаниям: полнота исходных данных, обоснованность экспертных суждений, содержание оценки ущерба и актуальность результата. Такая группировка позволяет рассматривать ограничения последовательно, от подготовки сведений до использования оценки.

Первая проблема заключается в недостатке достоверной информации об активах, угрозах и последствиях инцидентов. Если состав информационной системы описан неполно, часть значимых объектов может оказаться за пределами анализа. Значение идентификации активов для управления их уязвимостями раскрыто в исследовании [2]. Для оценки риска из этого следует необходимость связывать сведения о технических средствах и программном обеспечении с поддерживаемыми процессами. Например, одинаковые по характеристикам серверы могут иметь разную значимость в зависимости от допустимой продолжительности простоя обслуживаемых ими процессов.

Отсутствие сведений о ранее возникших нарушениях также не подтверждает низкий уровень риска. При использовании отраслевой статистики необходимо учитывать различия в масштабе организаций, составе систем и применяемых мерах защиты. Уменьшить неопределённость позволяют инвентаризация активов, документирование

последствий инцидентов и сопоставление нескольких источников. Если данных недостаточно, это ограничение следует отражать в выводах, сохраняя различие между установленными фактами и предположениями.

Вторая проблема связана с субъективностью экспертных суждений. Привлечение специалистов позволяет оценивать ситуации, для которых недостаточно наблюдений. Пример применения экспертного опроса и метода анализа иерархий для выбора опасных уязвимостей представлен в публикации [3]. Однако при оценке рисков одинаковые обозначения, например «высокая вероятность» или «существенный ущерб», могут пониматься участниками по-разному. Приоритеты защиты в таком случае зависят от неявных представлений экспертов. Необходимы единые описания уровней шкалы, фиксация аргументов и обсуждение расхождений. Согласование оценок не устраняет неопределённость полностью, но делает основания решения доступными для проверки.

Третья проблема – определение ущерба. Технические признаки нарушения не дают готового ответа на вопрос о потерях организации. В денежном выражении могут учитываться затраты на восстановление, дополнительные трудозатраты и потери из-за остановки деятельности; последствия для репутации требуют отдельного обоснования. Связь критериев принятия риска с экономическими показателями организации рассмотрена в исследовании [4]. При этом стоимость актива не следует автоматически отождествлять с ущербом: нарушение работы недорогого компонента способно остановить значимый процесс. Для обоснования последствий целесообразно привлекать владельцев процессов и финансовых специалистов, согласовывать состав потерь и исключать их повторный учёт.

Четвёртая проблема состоит в утрате актуальности оценки. Изменения программного обеспечения, состава пользователей, способов доступа и внешних услуг могут создавать условия, не учтённые ранее. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010 предусматривает мониторинг и пересмотр факторов риска [1]. На уровне организации целесообразно определять не только периодичность пересмотра, но и события, требующие внеплановой оценки: внедрение нового сервиса, изменение критичного процесса или выявление существенной уязвимости. Дата оценки, версия исходных данных и принятые допущения должны позволять установить, к каким условиям относится результат.

Сопоставление рассмотренных проблем приведено в таблице. Для каждой из них выделено возможное искажение управленческого решения и направление его предупреждения.

Рассмотренные меры следует применять совместно. Уточнение шкалы не компенсирует отсутствие значимого актива в перечне, а обновление сведений об угрозах не исправляет неполное описание ущерба. Перед использованием результата предлагается проверять четыре вопроса:

какие данные подтверждают оценку, как обоснованы суждения, какие последствия учтены и сохраняются ли исходные условия. Отсутствие ответа указывает на часть оценки, требующую уточнения.

Таблица

Проблемы оценки рисков ИБ и направления их решения

Проблема	Возможное искажение	Направление решения
Недостаток данных	Пропуск значимых активов и сценариев	Инвентаризация; проверка источников и полноты сведений
Субъективность суждений	Несопоставимые уровни риска и приоритеты	Общие шкалы; обоснование оценок; разбор расхождений
Сложность оценки ущерба	Неполный или повторный учёт потерь	Связь с процессами; согласование состава последствий
Изменение условий	Применение оценки за пределами её актуальности	Пересмотр по срокам и при существенных изменениях

Заключение. Выделены четыре взаимосвязанные группы проблем оценки рисков ИБ: недостаток данных, субъективность суждений, сложность определения ущерба и изменение условий. Для каждой группы установлены возможные искажения и направления их уменьшения. Предложенная последовательность вопросов может использоваться при внутреннем согласовании результатов. Она не заменяет методику оценки риска, но делает её ограничения явными. Перспектива дальнейших исследований связана с разработкой требований к исходным сведениям и описанию последствий, в том числе для страхования рисков ИБ.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности. – Москва: Стандартинформ, 2011.
2. Милославская, Н. Г. Управление активами информационно-телекоммуникационных сетей как обязательный этап управления их уязвимостями / Н. Г. Милославская, А. И. Толстой // Вопросы кибербезопасности. – 2025. – № 1 (65). – С. 73–85. – DOI 10.21681/2311-3456-2025-1-73-85. – EDN OXEAHA.
3. Грызунов, В. В. Выбор наиболее опасных уязвимостей для перспективных информационных систем критического применения / В. В. Грызунов, А. А. Гришечко, Д. Е. Сипович // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 1 (47). – С. 66–75. – DOI 10.21681/2311-3456-2022-1-66-75. – EDN SSVFRQ.
4. Козырь, Н. С. Денежные критерии риска информационной безопасности на основе подхода оценки активов / Н. С. Козырь, А. С. Макарян, Л. Л. Оганесян // Вопросы кибербезопасности. – 2024. – № 3 (61). – С. 51–60. – DOI 10.21681/2311-3456-2024-3-51-60. – EDN FOZFUK.

УДК 004.056.55

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЁННОГО ОТ АТАК ПО ВРЕМЕНИ АЛГОРИТМА БЛОЧНОГО ШИФРА «КУЗНЕЧИК»

Пацева Л.Ю., ORCID 0009-0008-0123-0971
Северодонецкий технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. Владимира Даля», г. Северодонецк, ЛНР, РФ
ply71@mail.ru

Введение. Программные реализации блочного шифра «Кузнечик» ГОСТ Р 34.12-2015 (подстановочно-перестановочной сети с 128-битным блоком и 256-битным ключом) уязвимы к атакам по времени из-за зависимостей времени выполнения от данных и ключа. Известные методы оптимизации [1] используют табличные выборки и условные переходы, что оказывает влияние на уязвимость к атакам по времени. Существующие исследования защиты от атак по побочным каналам [2; 3] ограничены визуальным анализом отдельных операций [2] либо маскированием исключительно S-блока без экспериментальной проверки [3]. Наивная реализация содержит два критических источника утечек: кэш-зависимые табличные обращения к S-блоку [4] и условные переходы при умножении в поле Галуа $GF(2^8)$ [2].

Цель. Разработка комплексной constant-time программной реализации блочного шифра «Кузнечик» для обоих направлений шифрования со строгой статистической верификацией.

Реализация. Защищённая программная реализация разработана поэтапно с заменой уязвимых компонентов наивной реализации:

– замена табличного S-блока (и обратного S^{-1}) на вычисление через 256 логических операций (bitslicing);

– замена умножения в поле Галуа $GF(2^8)$ на выбор из предварительно рассчитанной SL-таблицы для шифрования и развёртывания ключей;

– замена вычисления итерационных констант на выбор из предварительно рассчитанной таблицы;

– замена линейного регистра сдвига в L-преобразовании на метод «скользящего окна» по массиву двойного размера;

– размещение всех вспомогательных таблиц в стеке.

Методика тестирования. Тестирование выполнено на платформе x86 (Windows, GCC 9.2.0, O0) с измерением времени в тактах процессора (RDTSC с сериализацией LFENCE). Применены привязка к ядру, прогрев кэша, перемешивание порядка измерений и медианная фильтрация.

Проведены три теста линейного криптоанализа: Plaintext (зависимость от байта открытого текста), Key (зависимость от байта ключа) и

Hamming (корреляция с весом Хэмминга) как для зашифрования, так и для расшифрования с использованием одинаковых наборов входных данных.

Для выявления утечек применён однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA, $p = 0,05$). Расчеты для ANOVA выполнены с помощью библиотеки Boost C++ (1.91.0).

Размер эффекта оценён показателем Коэна f по формуле, полученной из базового определения f [5] на основе F-статистики и степеней свободы дисперсионного анализа (ANOVA). Для оценки точности построены 95 % доверительные интервалы (ДИ) на основе нецентрального F-распределения с численным решением методом Брента [6] в Python (SciPy, NumPy).

Результаты. Наивная реализация демонстрирует статистически значимые временные утечки по тестам Plaintext и Key для обоих направлений шифрования ($p < 0,001$). Размер эффекта f близок к низкому порогу Коэна ($f \approx 0,09–0,10$), верхние границы 95 % ДИ превышают порог 0,10, что указывает на практическую уязвимость. Расшифрование показывает более выраженные утечки, чем зашифрование (F-статистики 4,568–5,124 против 3,896–4,759).

Защищённая реализация обеспечивает снижение временных утечек (таблица). При зашифровании для теста Key F-статистика снижена и приближается к единице, размер эффекта f снижен до 0,049, верхняя граница 95 % ДИ не достигают порога 0,10, что свидетельствует о практической незначимости. При расшифровании F-статистики меньше единицы, размер эффекта f не превышает 0,04, верхние границы 95 % ДИ не достигают порога 0,10, а нижние включают нулевое значение, $p > 0,05$, что свидетельствует о полном устранении статистически значимых зависимостей.

Таблица

Результаты ANOVA для защищённой реализации

Направление	**Тест**	**F-статистика**	**p-значение**	**f**	**95 % ДИ**
Зашифрование	Plaintext	1,942	<0,001	0,0623	[0,052; 0,073]
	Key	1,180	0,025	0,0485	[0,038; 0,060]
	Hamming	0,492	0,688	0,0054	[0,000; 0,019]
Расшифрование	Plaintext	0,894	0,848	0,0395	[0,000; 0,052]
	Key	0,736	0,988	0,0254	[0,000; 0,044]
	Hamming	0,491	0,688	0,0054	[0,000; 0,019]

Защищённая реализация демонстрирует ускорение на 18–20 % по сравнению с наивной. Повышена стабильность: стандартное отклонение снижено в 3–5 раз.

Графическое сравнение F-статистик для наивной (VULNERABLE) и защищённой (SECURE) реализаций представлено на рисунке.

В отличие от предшествующих работ, предложенное решение обеспечивает защиту от атак по времени для обоих направлений шифрования с охватом всех компонентов, в отличие от методов

маскирования, ограниченных защитой первого порядка только нелинейного преобразования при зашифровании [3].

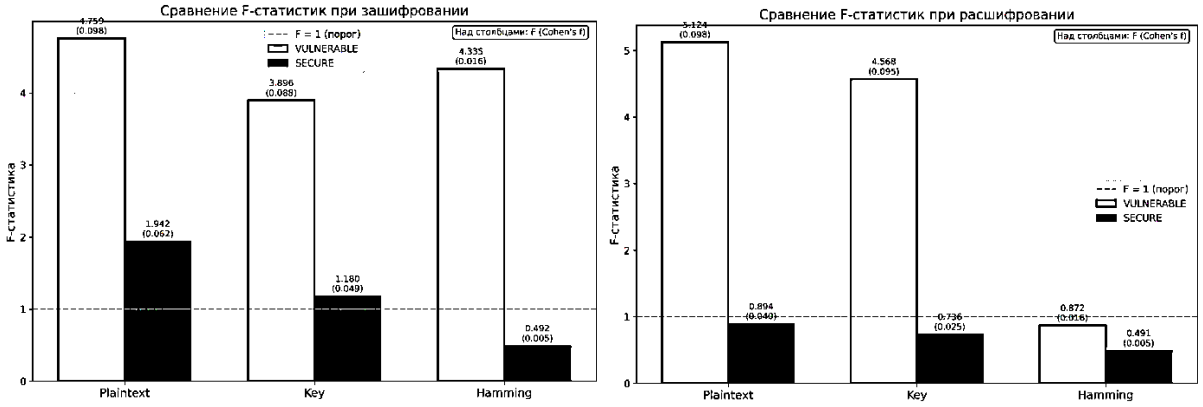


Рис. Сравнение F-статистик для наивной и защищённой реализаций

Заключение. Разработана и экспериментально протестирована защищённая от атак по времени программная реализация блочного шифра «Кузнечик» для обоих направлений шифрования. Основные результаты: снижение F-статистики для теста Key в 3,3 раза при зашифровании и в 6,2 раза при расшифровании; уменьшение размера эффекта f до 0,049 и 0,025 соответственно; ускорение выполнения на 18–20 %; снижение разброса времени в 3–5 раз. Предложенное решение обеспечивает практическую устойчивость к атакам по времени при одновременном повышении производительности. Ограничения исследования: тестирование выполнено на платформе x86; атаки по энергопотреблению и сбоям не рассматривались.

Список литературы

1. Гафуров, И. Р. Высокоскоростная программная реализация алгоритмов шифрования из ГОСТ Р 34.12-2015 // Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии. – 2022. – № 2. – С. 38-48. – EDN UWORBQ.
2. Зимников, Д. А. Исследование атаки по времени на блочный шифр ГОСТ 34.12-2018 «Кузнечик» // Актуальные проблемы математики, механики и информатики: сборник статей по материалам студенческой конференции, Пермь, 25 мая – 10 2021 года. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. – С. 21-25. – EDN DDXMDD.
3. Лаврентьева, Т. А. Защита от атак по побочным каналам на основе декомпозиции подстановки для алгоритма «Кузнечик» / Т. А. Лаврентьева, С. В. Матвеев // Математические вопросы криптографии. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 147–157. – DOI: 10.4213/mvk363.
4. Bernstein D. J. Cache-timing attacks on AES. – University of Illinois at Chicago, 2005.
5. Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences / J. Cohen – 2nd ed. – Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988. – 567 c.
6. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2007. – 1262 c.

УДК 621.396.96

АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМАХ АСУ И АСНИ

Подлесный В.Ю., Данилов В.В., д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
PikaAyzek@yandex.ru, ut5iv@mail.ru

Введение. Информационно-измерительные подсистемы АСУ и АСНИ обеспечивают получение данных о состоянии технологического объекта и передачу этих данных на уровень контроля и управления [1-3]. Качество дальнейших решений зависит не только от точности первичного измерительного преобразования, но и от того, насколько корректно обрабатываются сообщения при наличии помех, пропусков, выбросов и изменений режима работы объекта. В реальных условиях предположение о неизменности статистических характеристик измерительного шума может нарушаться: например, при переключении режимов оборудования, изменении нагрузки или ухудшении условий передачи данных [4, 5].

Постановка задачи. Пусть состояние контролируемого процесса в дискретный момент времени k описывается вектором x_k, а измерительное сообщение z_k формируется моделью

$$z_k = H_k x_k + v_k, \qquad x_k = F_k x_{k-1} + w_k,$$

где F_k – матрица динамики процесса; H_k – матрица наблюдения; w_k – возмущение модели процесса; v_k – ошибка измерения. В классической постановке ковариационные матрицы Q и R, описывающие w_k и v_k, считаются известными или постоянными. При нестационарности это предположение может приводить либо к чрезмерному сглаживанию быстрых изменений, либо к усиленному пропуску шумовых составляющих.

Цель – разработать метод адаптации параметров фильтрации по статистике инноваций (невязок) так, чтобы повысить устойчивость обработки при смене режима измерений без необоснованного увеличения вычислительной нагрузки [6].

Математическая модель адаптивной обработки. Для линейной модели состояние прогнозируется на основе предыдущей оценки [4, 7]:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1}, \qquad P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k,$$

где $\hat{x}_{k|k-1}$ – прогноз состояния, $P_{k|k-1}$ – ковариация ошибки прогноза. После поступления измерения рассчитываются инновация и её ковариация:

$$e_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}, \qquad S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k.$$

Для оценки согласованности измерения с моделью используется нормированная величина $d_k = e_k^T S_k^{-1} e_k$. Если d_k остаётся в ожидаемом диапазоне, алгоритм сохраняет текущий режим обработки. Устойчивое превышение порога в течение нескольких отсчётов рассматривается как признак изменения процесса или статистики шума [6]. Одиночное

превышение не должно автоматически вызывать резкую перенастройку, поскольку оно может быть вызвано случайным выбросом.

Предлагаемый алгоритм включает следующие этапы:

1) получение измерительного сообщения и проверка его формата, временной метки и допустимого диапазона;

2) вычисление прогноза состояния и ковариации ошибки;

3) вычисление инновации e_k, её ковариации S_k и нормированной невязки d_k;

4) анализ последовательности d_k на скользящем окне с учётом порога и длительности отклонения;

5) при подтверждённой смене режима – плавная корректировка Q_k и/или R_k в заданных пределах;

6) вычисление обновлённой оценки состояния, регистрация ошибки, времени обработки и факта переключения режима.

Раздельная корректировка Q_k и R_k принципиальна: увеличение Q_k позволяет фильтру быстрее реагировать на изменение динамики объекта, тогда как увеличение R_k снижает доверие к текущему измерению при росте его шума. При этом по одной невязке не всегда возможно однозначно определить причину отклонения. Поэтому параметры следует изменять консервативно, а вывод о смене режима принимать по совокупности нескольких наблюдений. Для многомерных сообщений может использоваться нормированная невязка с учётом размерности наблюдения.

План экспериментальной проверки. Проверку предлагается выполнить в MATLAB/Simulink либо в другой среде численного моделирования, используя воспроизводимые тестовые последовательности. Следует сформировать как минимум четыре сценария: стационарный сигнал с постоянным уровнем шума; скачкообразное изменение состояния объекта; рост дисперсии измерительного шума; кратковременные выбросы или отдельные пропущенные сообщения. При необходимости добавляется сценарий плавного дрейфа параметров.

Сравнение должно проводиться для трёх вариантов: исходные измерения без фильтрации; фильтр Калмана с фиксированными параметрами Q и R; предлагаемый адаптивный фильтр. Для корректности сравнения всем вариантам следует подавать одинаковые входные данные и использовать одинаковые начальные условия. Параметры алгоритма и правила формирования сценариев необходимо зафиксировать до запуска эксперимента, чтобы результаты можно было воспроизвести.

В качестве критериев предлагается использовать среднеквадратическую ошибку оценки RMSE, максимальную абсолютную ошибку, долю отсчётов с превышением допустимого порога, время реакции на изменение состояния, среднюю и максимальную вычислительную задержку, а также число ложных переключений адаптивного режима. Для АСУ и АСНИ важно оценивать не только уменьшение ошибки, но и своевременность выдачи результата: чрезмерное сглаживание может

снижать численную ошибку на спокойном участке, одновременно ухудшая реакцию на быстрые изменения.

Научно корректный вывод может быть сделан только после проведения вычислительного эксперимента. На текущем этапе предложенные сценарии и критерии являются планом проверки, а не описанием уже полученных результатов. После моделирования следует добавить таблицу с параметрами сценариев, сравнительными значениями метрик и анализом случаев, в которых адаптация даёт преимущество или, напротив, увеличивает ошибку.

Заключение. Предложено направление развития методов обработки измерительных сообщений в информационно-измерительных подсистемах АСУ и АСНИ – адаптивная настройка фильтрации по статистике инноваций. Подход ориентирован на ситуации, в которых изменяются динамика объекта и характеристики измерительных помех. В отличие от фильтра с неизменными параметрами, адаптивная схема предусматривает обнаружение устойчивого отклонения, ограниченную корректировку параметров модели и проверку результата по точности и вычислительной задержке. Дальнейшая работа должна включать реализацию алгоритма, выбор обоснованных порогов, серию сравнительных экспериментов и анализ воспроизводимости.

Список литературы

1. Подлесный В. Ю. Процедура восстановления непрерывных сообщений в измерительных процессах в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, И. А. Третьяков, В. В. Данилов [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 112-120. – DOI 10.5281/zenodo.15056709. – EDN MFJTTH.
2. Панарин В. М. Информационно-измерительная система обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод / В. М. Панарин, А. А. Маслова, Е. М. Рылеева и др. // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 4. – С. 5-18. – DOI 10.5281/zenodo.18229624. – EDN PWBTTT.
3. Баширов, М. Г. Применение промышленных информационно-измерительных и управляющих систем для построения цифровых двойников: опыт разработки на примере процесса гидрирования ацетилена / М. Г. Баширов, К. А. Крышко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2026. – № 1. – С. 5-15. – DOI 10.5281/zenodo.19201696. – EDN XGWVDY.
4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. 3-е изд. / А. Б. Сергиенко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 756 с.
5. Шахтарин Б. И. Фильтры Винера и Калмана: учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. / Б. И. Шахтарин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 396 с.
6. Чернодаров, А. В. Идентификация моделей и адаптивная фильтрация шумов инерциальных измерителей / А. В. Чернодаров, С. А. Иванов // Труды МАИ. – 2018. – № 99. – С. 15. – EDN XOGNOH.
7. Синицын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева / И. Н. Синицын. – М.: Логос, 2007. – 776 с.

УДК 621.391.7

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ЗАЩИТЫ БЕСПРОВОДНОГО ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ, ПОСТРОЕННОГО НА БАЗЕ АНАЛОГОВОЙ РАЦИИ

Рушечников Я.И.
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
ya.rushechnikov@donnu.ru

Введение. Распространённость и доступность современных радиоэлектронных средств, в том числе реализующих обмен информации, растёт высокими темпами, что не во всех случаях приводит к росту защищённости. Задачи информационной безопасности (ИБ) должны решаться ещё на этапе прототипирования устройства, и если такого не происходит, то они решаются в формате «приложения», специальных функций, которые расширяют возможности, в том числе и защитные. Разработка таких решений требует не только понимания ИБ как таковой, но и высокой осведомлённости в предметной области, для которой это самое решение в области ИБ делается [1].

Цель работы состоит в компьютерном прототипировании / моделировании механизма защиты радиообмена, построенного на базе раций УКВ диапазона, реализующих открытый механизм радиообмена.

Основная часть. Несмотря на то, что в доступных на рынке радиостанциях уже существует система условного сокрытия информации в виде скремблера [2], разработки в подобном направлении активно ведутся и выпускаются устройства, поддерживающие новые механизмы защиты. Наиболее высокий уровень защиты доступен именно в цифровых радиостанциях, информация в которых передаётся способом, похожим на обмен в компьютерных сетях. Такие станции поддерживают обмен в рамках современных криптографических алгоритмов.

Что же касается доступных и свободно распространяемых систем аналоговой модуляции, в которых информационной составляющей радиообмена выступает голос, то кроме скремблера среди доступных средств аналогов нет. В данной работе предлагается внесение поверх аналогового радиообмена ещё одного слоя абстракции, который реализует передачу текстовой информации с криптографической защитой.

Реализация такого алгоритма возможна в среде прототипирования под названием GNU Radio, в которой можно реализовать следующий набор трансформаций:

– получение текстовой информации из файла или потока ввода;

– разбиение информации на порции в соответствии с каналом передачи (для передачи в режиме близком к реальному времени);

– криптографические преобразования над информацией;

– модуляция текстовой или битовой информации в звуки с высокой и низкой амплитудами;

– передача информации в звуковую карту.

Реализация описанной выше схемы в среде прототипирования GNU Radio имеет вид, представленный на рисунке 1.

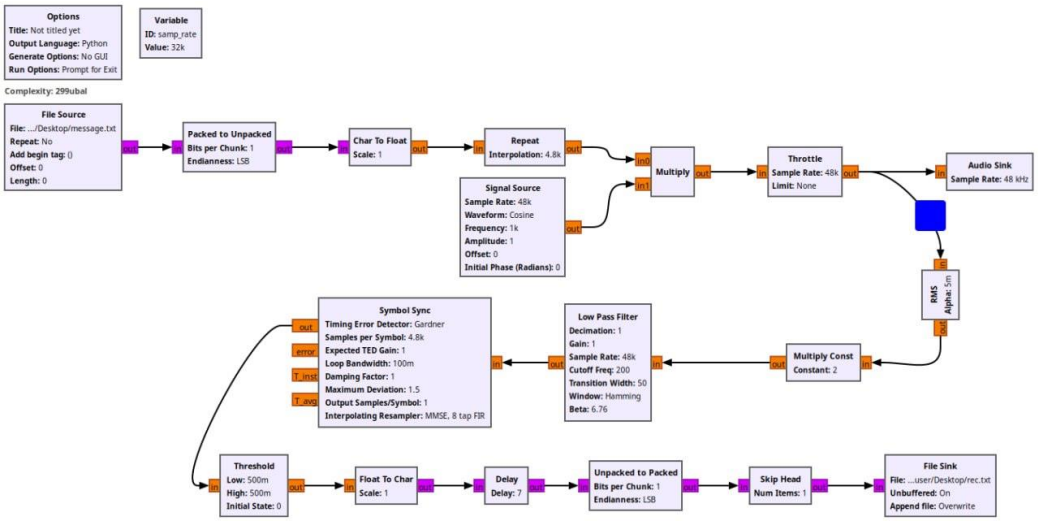


Рис. 1. Потоковый граф подготовки и изменения информации

Представленный на рисунке 1 потоковый граф условно делится на две части: передатчик, все блоки которого расположены до синего квадрата, и приёмник, все блоки которого расположены после.

На стороне передатчика из файла вычитывается текстовая информация, которая трансформируется в последовательность условных импульсов, применимых для передачи в виде аналогового звукового сигнала. Сформированная последовательность подключается к линейному входу УКВ рации.

На стороне передатчика реализуется обратный процесс извлечения и преобразования состояний из условных звуковых импульсов в логические уровни битового кодирования. Информация в данном случае снимается с линейного выхода (динамика) УКВ рации.

Более упрощённо архитектура системы представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Схема симплексного информационного обмена

Касаемо средств защиты, которые являются потенциально реализуемыми в схеме на рисунке 1 можно выделить следующее:

непосредственную криптографическую защиту можно сформировать как во время создания текстового файла (любая криптосистема) так и вплоть до моментов трансформации байтов в последовательность уровней (импульсов) (только симметричные криптосистемы), чему и будут посвящены последующие работы в рамках данной тематики.

Со стороны приёма и при наличии ключа для расшифровки происходит обратный процесс, и в конце в текстовый файл попадает расшифрованный текст, при этом по каналу связи передаётся зашифрованная информация.

Заключение. Предложенная методика, несмотря на запрет передачи зашифрованной информации в безлицензионных вещательный диапазонах (напр. 433 МГц) может использоваться на объектах, изолированных от окружающей среды и позволяет реализовать конфиденциальный низкоскоростной обмен информацией по радиоканалу.

Список литературы

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026684468 Российская Федерация. Система обеспечения конфиденциальности радиопереговоров подразделений в условиях радиоэлектронного противодействия: заявл. 29.05.2026: опубл. 12.08.2026 / Н. А. Ажогин, В. Р. Ельцов, Д. С. Ковриченков. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=91958572 (дата обращения: 03.10.2026). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. – EDN FFBDEZ.
2. Лебедев, Е. С. методы скремблирования аудиосигналов / Е. С. Лебедев, В. Е. Вахтин, Д. А. Бобров // Актуальные исследования. – 2025. – № 33(268). – С. 11-14. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=82788198 (дата обращения: 03.10.2026). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. – EDN KJMRBW.

УДК 621.396.6

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ

***Сабирьянов А.В.*,**
***Чони Ю.И.*,** канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-2787-7959
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
almaz.sabiryanov03@gmail.com

Введение. Направленные ответвители (НО) широко используются в СВЧ-устройствах различного назначения благодаря тому, что в отличие от тройниковых делителей мощности обеспечивают развязку между выходными портами [1, 2]. В системах фазированных антенных решёток (ФАР), активных фазированных антенных решётках (АФАР), устройствах 5G и 6G, радиолокации и измерительной технике НО применяются для

деления и суммирования мощности, контроля уровня сигнала и создания балансных схем. Актуальность темы обусловлена ростом требований к миниатюризации СВЧ-устройств при сохранении высоких электрических параметров. Традиционный односекционный НО на полосковых линиях имеет длину связанного участка, близкую к λ/4 (на частоте 2 ГГц на подложке FR-4 это примерно 28-30 мм) [1, 2]. Предлагаемая сдвоенная (dual-section) конструкция позволяет существенно сократить продольные размеры устройства.

Цель – выяснить частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи в зависимости от топологии сдвоенного НО, а также разработать компактный сдвоенный направленный ответвитель на полосковых линиях с уменьшенной длиной при сохранении рабочих характеристик в диапазоне частот 1,5-2,5 ГГц.

Основная часть. Для решения задачи миниатюризации была предложена топология сдвоенного НО, в которой два участка связи расположены параллельно [3]. Это позволяет сократить общую длину устройства по сравнению с традиционным односекционным вариантом. Моделирование проводилось для подложки PTFE (lossy) с толщиной 2 мм и относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 4$.

Оптимизация геометрических параметров в программе TXLine позволила определить ширину проводников: $w_0 = 6$ мм (для 50-омных линий), $w_1 = w_2 = 3{,}5$ мм (в области связи), зазор S = 0,5 мм. Длина участка связи составила 26 мм.

На рис. 1 представлена топология разработанного сдвоенного направленного ответвителя.

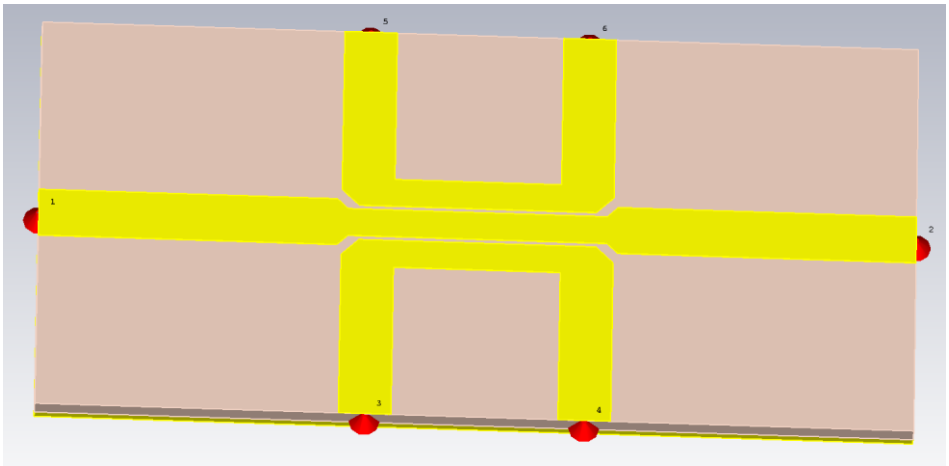


Рис. 1. Топология двухканального направленного ответвителя

Для оценки эффективности предложенной конструкции было проведено электродинамическое моделирование в CST Microwave Studio. На рис. 2 приведены частотные зависимости S-параметров в диапазоне 1,0-3,0 ГГц.

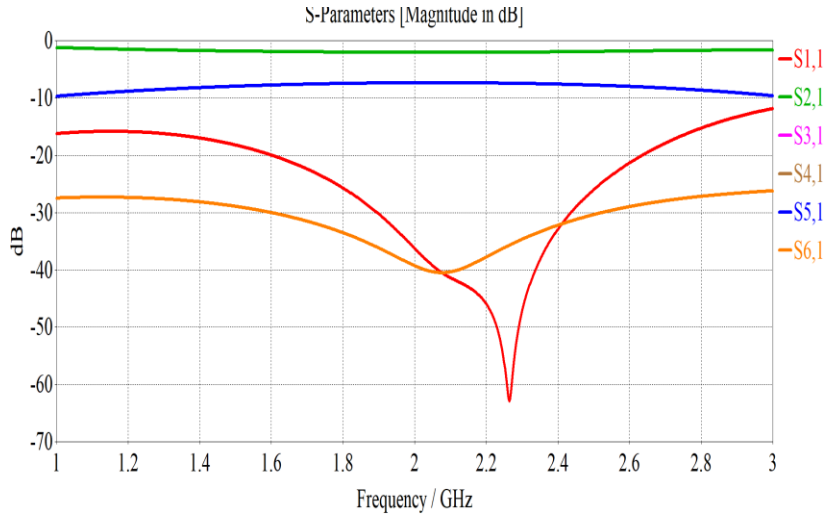


Рис. 2. Частотные характеристики S-параметров сдвоенного НО

Анализ результатов моделирования показывает:

– **Коэффициент отражения (S_{11})** имеет глубокий минимум -62 дБ на частоте около 2,25 ГГц, что свидетельствует об отличном согласовании. В рабочей полосе 1,5-2,5 ГГц значение S_{11} не превышает -25 дБ.

– **Коэффициент передачи (S_{21})** находится на уровне -1,0…-2,0 дБ, демонстрируя низкие вносимые потери во всём исследуемом диапазоне.

– **Коэффициенты связи (S_{31} и S_{51})** стабильны и составляют -8…-11 дБ в рабочей полосе.

– **Коэффициенты изоляции (S_{41} и S_{61})** достигают значений в диапазоне -35…-42 дБ на центральных частотах, что подтверждает высокую направленность устройства (до 30-32 дБ).

Для сравнения был также промоделирован классический односекционный НО с длиной участка связи 28 мм [1, 2]. Хотя он показал хорошие результаты (S_{11} ≈ -38 дБ, направленность около 25 дБ), предложенный сдвоенный вариант обеспечивает сопоставимые или лучшие характеристики при меньшей длине, что подтверждает эффективность выбранного подхода к миниатюризации.

Проведённое параметрическое исследование влияния зазора S между полосками на коэффициент связи показало монотонное увеличение $|S_{31}|$ при уменьшении зазора (табл.). Однако выбор S = 0,5 мм является оптимальным компромиссом, обеспечивающим достаточный уровень связи (-7,4 дБ) и хорошее согласование.

Таблица

Зависимость коэффициента связи от зазора S

Зазор S, мм	**Коэффициент связи S_{31}, дБ**
0,5	-7,40
0,4	-6,73
0,3	-6,13
0,2	-5,71
0,1	-5,43

Заключение. Результаты моделирования подтверждают работоспособность сдвоенного НО и возможность сокращения продольного размера по сравнению с обычным односекционным вариантом (длина связи 26 мм против 28 мм) при сохранении и даже улучшении электрических характеристик: отличное согласование (S_{11} до -62 дБ), низкие вносимые потери, стабильный коэффициент связи и высокая направленность (до 32 дБ). Предложенная конструкция может найти применение в ФАР, аппаратуре 5G/6G, измерительной технике и устройствах контроля мощности.

Список литературы

1. Смирнов В. В. Устройства СВЧ и антенны: учебное пособие / В. В. Смирнов, В. П. Смолин. – СПб.: БГТУ «Военмех», 2012. – 188 с.
2. Малорацкий Л. Г. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях / Л. Г. Малорацкий, Л. Р. Явич. – М.: Советское радио, 1972. – 232 с.
3. Pozar D.M. Microwave Engineering. 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. – 752 p.

УДК 621.396.967:623.76

ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ БПЛА В КА-ДИАПАЗОНЕ НА ФОНЕ ПОМЕХ

Снимщиков М.С.[1], Слепцов В.М.[1],
Кочетова Ж.Ю.[1,2], д-р геогр. наук, доц., ORCID 0000-0001-8838-9548
[1]ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
[2]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, РФ
zk_vva@mail.ru

Введение. Обнаружение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) радиолокационными средствами осложняется низкими значениями эффективной площади рассеяния (ЭПР), высоты полета и скорости [1]. Малая высота приводит к маскированию отраженного от БПЛА сигнала переотражениями от подстилающей поверхности, низкая скорость – к перекрытию спектров полезного сигнала и пассивной помехи в системе селекции движущихся целей (СДЦ) [2]. Ка-диапазон длин волн обеспечивает высокое разрешение и чувствительность к малоразмерным целям, но характеризуется повышенным затуханием в атмосфере.

Цель – обосновать применимость миллиметровых РЛС для ближнего обнаружения БПЛА (2–3 км) в условиях атмосферных и поверхностных помех.

Основная часть. Помеховая обстановка при радиолокационном обнаружении БПЛА в Ка-диапазоне определяется атмосферными и

поверхностными помехами. Удельное затухание радиоволн в Ка-диапазоне (35 ГГц) для различных метеоусловий приведено в таблице 1 [3].

Таблица 1

Удельное затухание радиоволн в Ка-диапазоне (35 ГГц)

Метеоусловие	Удельное затухание, дБ/км	Двустороннее затухание на трассе 2 км, дБ
Чистая атмосфера	0,2	0,8
Дождь 4 мм/ч	0,9	3,6
Дождь 16 мм/ч	3,6	14,4
Дождь 50 мм/ч	11,2	44,8
Туман 0,5 г/м³	0,6	2,4
Облака	0,08	0,3

Дождь интенсивностью 16 мм/ч вносит на трассе 2 км двухстороннее затухание 14,4 дБ, что соответствует снижению дальности обнаружения в 2,3 раза по сравнению с чистой атмосферой. Туман и облака вносят затухание на порядок меньше и не являются определяющим фактором для дальностей 2–3 км.

К пассивным помехам относятся отражения от подстилающей поверхности. Согласно экспериментальным данным, удельная ЭПР подстилающей поверхности возрастает на 10–20 дБ при переходе от X-диапазона (9,4 ГГц) к Ка-диапазону (35 ГГц) для большинства типов покровов; для поверхностей с древесной растительностью рост достигает 22 дБ [4]. Однако высокое разрешение Ка-диапазона компенсирует этот рост за счет уменьшения площади элемента разрешения. Эта площадь типовой береговой РЛС (Ка-диапазон, длительность импульса 55 нс, ширина луча 0,22°) на дальности 2 км составляет 63 м², при длительности 125 нс – 144 м². Для сравнения, типовая РЛС X-диапазона (длительность импульса 1 мкс, ширина луча 1,5°) имеет элемент разрешения площадью 7854 м². Уменьшение площади элемента разрешения составляет 17–21 дБ.

Отношение сигнал/пассивная помеха для цели с ЭПР 0,3 м² на дальности 2 км приведено в таблице 2. В расчете принято типовое значение удельной ЭПР подстилающей поверхности 0,01 м²/м² для X-диапазона и 0,1 м²/м² для Ка-диапазона (различие 10 дБ – нижняя граница измеренного диапазона) [4].

Таблица 2

Отношение сигнал/пассивная помеха для цели с ЭПР 0,3 м² на дальности 2 км

Диапазон	Площадь элемента разрешения, м²	Удельная ЭПР поверхности, м²/м²	ЭПР помехи, м²	Отношение сигнал/пассивная помеха, дБ
X-диапазон (1 мкс, 1,5°)	7854	0,01	78,5	−24,2
Ка-диапазон (125 нс, 0,22°)	144	0,1	14,4	−16,8
Ка-диапазон (55 нс, 0,22°)	63	0,1	6,3	−13,2

Выигрыш Ка-диапазона в отношении сигнал/пассивная помеха составляет 7–11 дБ за счет меньшего элемента разрешения. При этом даже в Ка-диапазоне пассивная помеха превышает сигнал цели на 13–17 дБ, что требует применения когерентной обработки и СДЦ [2]. При максимальных значениях роста удельной ЭПР (20 дБ для отдельных типов поверхности) преимущество Ка-диапазона нивелируется.

Радиолокационная заметность БПЛА в Ка-диапазоне определяется особенностями рассеяния на элементах конструкции. При длине волны 8,6 мм размеры большинства элементов БПЛА (фюзеляж, крыло, шасси) значительно превышают длину волны (режим оптической зоны рассеяния), при котором ЭПР слабо зависит от частоты и определяется геометрией отражающих элементов. Расчеты ЭПР малых объектов в X- и Ku-диапазонах показывают, что увеличение частоты не приводит к существенному росту ЭПР [5]; в Ка-диапазоне этот эффект сохраняется. Штанги и стойки неубирающегося шасси формируют уголковые отражатели с устойчивой ЭПР, что делает ударные БПЛА самолетного типа стабильно наблюдаемыми. Радиопоглощающие покрытия, эффективные в X-диапазоне, теряют эффективность в Ка-диапазоне из-за уменьшения толщины скин-слоя относительно длины волны. Вращение винтов создает микродоплеровскую модуляцию отраженного сигнала, которая в Ка-диапазоне выражена сильнее из-за более высокой несущей частоты и может использоваться для классификации типа БПЛА.

Заключение. Выигрыш Ка-диапазона в разрешении (17–21 дБ по площади элемента разрешения) перекрывает рост удельной ЭПР подстилающей поверхности (10 дБ для большинства типов покровов) и обеспечивает чистое преимущество в отношении сигнал/пассивная помеха 7–11 дБ по сравнению с X-диапазоном. Атмосферное затухание в дождь 16 мм/ч (3,6 дБ/км) ограничивает дальность обнаружения, но на рубежах 2–3 км остается приемлемым. Радиолокационная заметность БПЛА в Ка-диапазоне сохраняется на уровне X-диапазона за счет уголковых отражателей конструктивных элементов и снижения эффективности радиопоглощающих покрытий. Микродоплеровская модуляция от вращения винтов в Ка-диапазоне выражена сильнее и может использоваться для классификации цели. Таким образом, Ка-диапазон эффективен для ближнего обнаружения БПЛА: высокое разрешение компенсирует атмосферные потери, а повышенная заметность конструктивных элементов обеспечивает обнаружение целей с ЭПР от 0,05 м². Для поверхностей с высоким ростом удельной ЭПР (20 дБ и более, древесная растительность) преимущество Ка-диапазона снижается и требует дополнительной СДЦ.

Список литературы

1. Ананенков А. Е. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / А. Е. Ананенков, Д. В. Марин, В. М. Нуждин [и др.] // Труды МАИ. – 2016. – № 91. – С. 19. – EDN XEQXAX.

2. Абраменков, В. В. Обоснование подхода к построению системы селекции движущихся целей радиолокационной станции обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / В. В. Абраменков, О. В. Васильченко, А. П. Муравский // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2019. – Т. 12, № 7. – С. 780-791. – DOI 10.17516/1999-494X-0178. – EDN VBERUM.
3. Соколов, А. В. Моделирование дальности миллиметровых радиолокационных станций в дождях / А. В. Соколов, Р. Н. Чеканов // Журнал радиоэлектроники. – 2002. – № 12. – С. 2. – EDN MSRZBL.
4. Садов Д. А. Экспериментальное исследование рассеяния электромагнитных волн подстилающей поверхностью в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн / Д. А. Садов, А. В. Христенко, А. В. Новиков и др. // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 356-360. – DOI 10.1134/S0033849419040089. – EDN YYYYSD.
5. Парнес, М. Расчет эффективной поверхности рассеяния малых объектов / М. Парнес // СВЧ-электроника. – 2017. – № 2(3). – С. 62-64. – EDN FHXHUQ.

УДК 621.391

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МНОГОФАЗНОГО КОДА ФРЕНКА

Суслин А.В., канд. техн. наук, ORCID 0009-0007-0800-2202,
Кузин А.А.
ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
510323@list.ru

Введение. Многофазные коды Френка (квантовые фазовые коды) обладают уникальными корреляционными свойствами. Поэтому модели радиолокационных сигналов, построенные на основе таких кодов представляют практический интерес.

Цель исследование особенностей формирования многофазного кода Френка в среде программирования Python.

Основная часть. В радиолокации многофазные коды Френка применяются для увеличения отношения сигнал/шум (энергетические возможности), а также улучшения разрешения [1-4]. Код Фрэнка обладает хорошими автокорреляционными свойствами и часто применяется в радиолокационных системах для сжатия импульсов.

Код Френка – многофазный (полифазный) код, его база N определяется выражением:

$$N = M^2,$$

где M – число фаз. Фазы элементов задаются матрицей Френка [3].

Листинг программы формирующей многофазный коды Френка в среде программирования Python представлен ниже.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def frank_code(M):
    """
    Формирует код Фрэнка для M фаз.
    Длина кода N = M^2.
    Возвращает массив фаз в радианах.
    """
    N = M * M
    phases = np.zeros(N)
    for n in range(N):
        i = n // M      # номер строки
        j = n % M       # номер столбца
        phases[n] = (2 * np.pi / M) * i * j
    phases = np.mod(phases, 2 * np.pi)
    return phases
 def frank_signal(M, f_chip=1000, f_carrier=10000, fs=200000, A=1.0):
    """     Формирует ФМн-сигнал с кодом Фрэнка.
    M         – число фаз (длина кода N = M^2)
    f_chip    – частота следования чипов, Гц
    f_carrier – несущая частота, Гц
    fs        – частота дискретизации, Гц
    A         – амплитуда    """
    phases = frank_code(M)
    N = len(phases)
    Tchip = 1 / f_chip
    T = N * Tchip
    t = np.arange(0, T, 1/fs)
    k = np.floor(t / Tchip).astype(int)
    k = np.clip(k, 0, N – 1)
    s = A * np.cos(2 * np.pi * f_carrier * t + phases[k])
    return t, s, phases
 if __name__ == "__main__":
    M = 4  # число фаз, длина кода N = 16
    phases = frank_code(M)
     print(f"Код Фрэнка: M = {M}, N = {M*M}")
    print("Фазы (град):")
    print(np.round(np.degrees(phases), 1))
     t, s, _ = frank_signal(M, f_chip=1000, f_carrier=10000, fs=200000)
     plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.subplot(2, 1, 1)
    plt.stem(np.arange(len(phases)), np.degrees(phases), basefmt=" ")
```

```
plt.title(f"Код Фрэнка, M={M}, N={M*M}")
plt.xlabel("Номер чипа")
plt.ylabel("Фаза, град")
plt.grid(True)
 plt.subplot(2, 1, 2)
plt.plot(t * 1e3, s)
plt.title("ФМн-сигнал с кодом Фрэнка")
plt.xlabel("Время, мс")
plt.ylabel("s(t)")
plt.grid(True)
 plt.tight_layout()
plt.show()
```

Результат моделирования представлен на рисунке.

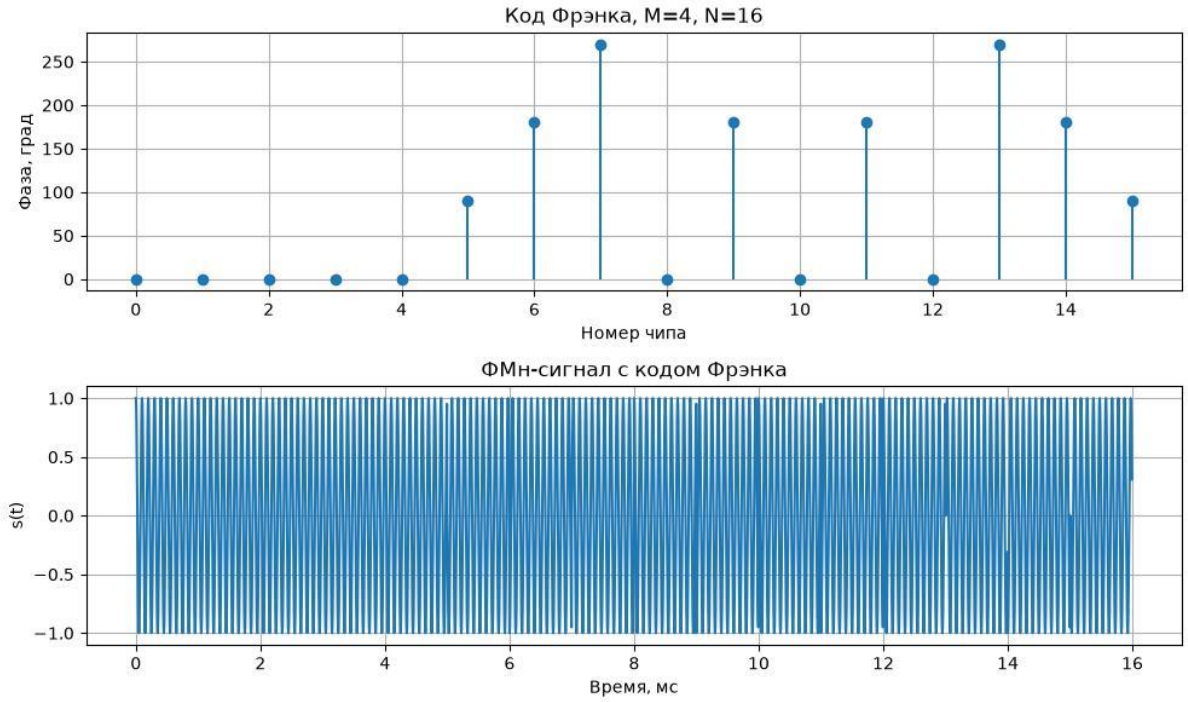


Рис. Результат моделирования

Особенностью формирования таких сигналов является поиск способов устранение разрывностей в их структуре [5, 6].

Заключение. Таким показана возможность моделирования на языке программирования Python фазоманипулированного сигнала по закону кода Френка, для дальнейшего исследования его характеристик.

Список литературы

1. Радиотехнические системы: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю. М. Казаринов [и др.]; под ред. Ю. М. Казаринова – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 592 с. – ISBN: 978-5-7695-3767-7.

2. Дудник П. И., Кондратенков Г. С., Татарский Б. Г., Ильчук А. Р., Герасимов А. А. Авиационные радиолокационные комплексы / под ред. П. И. Дудника. – М.: ВВАИ имени проф. Н. Е. Жуковского, 2006. – 1112 с. – ISBN: 5-903111-15-7.
3. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: Теория и применение: пер. с англ. / под ред. В.С. Кельзона. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
4. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справочник / Я. Д. Ширман [и др.]; ред. Я. Д. Ширман. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Радиотехника, 2007. – 510 с. – ISBN 5-88070-112-3.
5. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Корреляционные и спектральные характеристики радиолокационного фазоманипулированного сигнала с плавным изменением фазы // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – №4. – С. 7–13. – EDN: PDXVON.
6. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Обнаружение фазоманипулированных сигналов с плавным изменением фазы при приеме на фоне шума // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2012. –Т. 55. – № 1. – С. 55–60.– EDN: PAJCAD.

УДК 621.391

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Суслин А.В., канд. техн. наук, ORCID 0009-0007-0800-2202,
Кузин А.А.
ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
510323@list.ru

Введение. Радиотехнические системы – сложные технические системы, которые осуществляют формирование, передачу и прием информации по средствам радиоволн. Радиоволны, используемые в радиолокации, называют радиолокационными сигналами, от характеристик которых зависят тактико-технические характеристики радиолокационных систем (технических средств для получения радиолокационной информации).

Цель исследование особенностей формирования фазоманипулированного сигнала с законом модуляции фазы между элементарными импульсами по закону кода Баркера в среде программирования Python.

Основная часть. Радиолокация – область радиоэлектроники, решающая задачи локации (обнаружения и измерения координат) и определения свойств различных объектов с помощью радиоволн. Радиоволны, используемые в радиолокации, называют радиолокационными сигналами [1-5]. В настоящее время широкое распространение находят фазоманипулированные сигналы (ФМн-сигналы) (бинарные фазовые коды) – сложные сигналы, фаза несущего колебания которого изменяется дискретно по определенному закону. Наиболее распрост-

ранены последовательности Баркера, последовательности максимальной длины, многофазные последовательности Баркера, квантовые фазовые коды Фрэнка, коды Хаффмана.

Предлагается поочередное моделирования этих кодов в среде программирования Python, и дальнейшее детальное рассмотрение их корреляционных и спектральных характеристик [4, 5].

Ниже представлен пример программы на языке программирования Python, которая формирует код Баркера с базой n=13, (длина кода Баркера: 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13), f_chip – частота следования чипов, Гц, f_carrier – несущая частота, Гц, fs – частота дискретизации, Гц, A – амплитуда. Переводит его в фазовую манипуляцию +1 → 0, –1 → π и строит ФМн-сигнал.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Все известные коды Баркера: +1 / -1
BARKER = {
   13: [1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1],
}
 def get_barker(n):
   """Возвращает код Баркера длины n."""
   if n not in BARKER:
      raise ValueError(f"Нет кода Баркера длины {n}. Доступны: {sorted(BARKER)}")
   return np.array(BARKER[n], dtype=float)
 def barker_phase_code(n):
   """Фазовый код: +1 -> 0 рад, -1 -> pi рад."""
   c = get_barker(n)
   return np.where(c > 0, 0.0, np.pi)
 def bpsk_barker_signal(n, f_chip=1000.0, f_carrier=10000.0, fs=200000.0, A=1.0):
   c = get_barker(n)
   chip_phase = np.where(c > 0, 0.0, np.pi)
    Tchip = 1.0 / f_chip
   T = n * Tchip
    t = np.arange(0.0, T, 1.0 / fs)
    # номер чипа для каждого отсчёта времени
   k = np.floor(t / Tchip).astype(int)
   k = np.clip(k, 0, n – 1)
    # ФМн-сигнал: cos(2*pi*f0*t + phase_k)
   s = A * np.cos(2.0 * np.pi * f_carrier * t + chip_phase[k])
    return t, s, c, chip_phase
 if __name__ == "__main__":
   n = 13  # длина кода Баркера
```

```
t, s, c, chip_phase = bpsk_barker_signal(
    n=n,
    f_chip=1000.0,
    f_carrier=10000.0,
    fs=200000.0,
    A=1.0
)
 print("Код Баркера c_k:", c.astype(int).tolist())
print("Фазы чипов, рад:", np.round(chip_phase, 3).tolist())
print("Фазы чипов, град:", np.round(np.degrees(chip_phase), 1).tolist())
```

Результат моделирования представлен на рисунке.

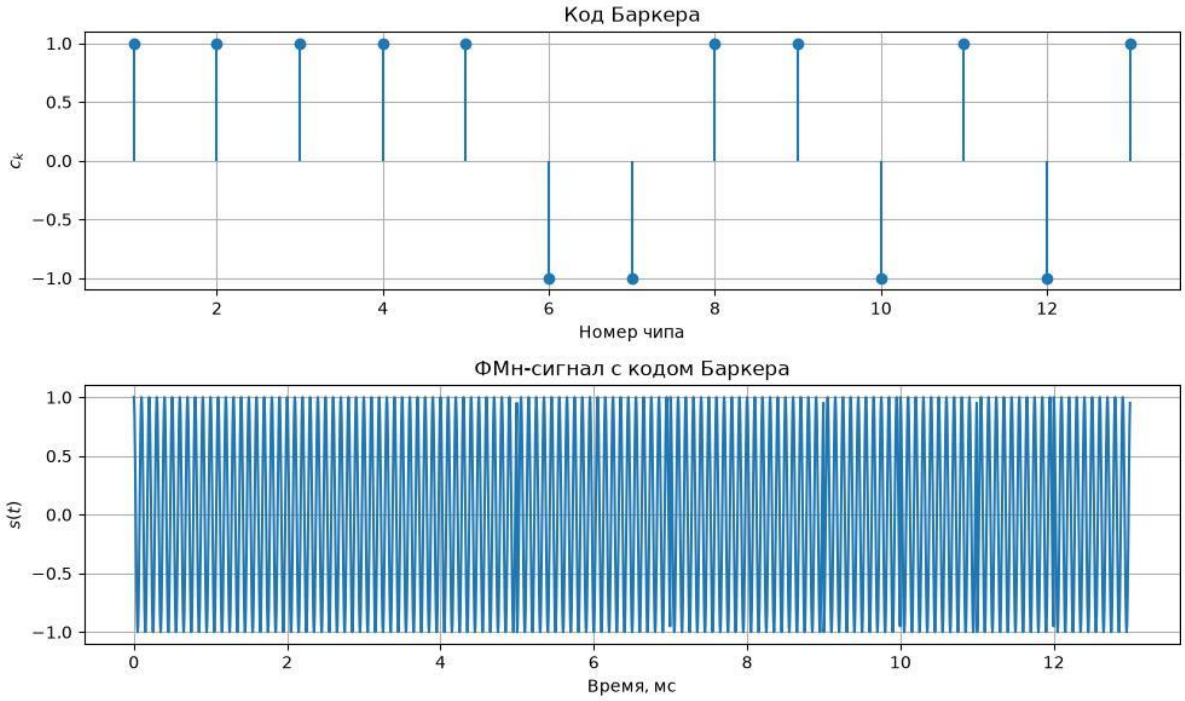


Рис. Результат моделирования

Программа поддерживает все известные коды Баркера длин 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13. Можно заметить, что в моменты скачкообразного изменения фазы, структура сигнала имеет видимые изменения, вызванные тем, что фаза несущего колебания меняет свое значение. Могут появиться разрывности в моменты скачкообразного изменения фазы, вызванные тем, что на временном интервале, соответствующем длительности элементарного импульса, может не укладываться целое число периодов несущего колебания [3].

Заключение. Таким показана возможность моделирования на языке программирования Python фазоманипулированного сигнала по закону кода Баркера, для дальнейшего исследования его структуры и характеристик.

Список литературы

1. Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю. М. Казаринов [и др.]; под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 592 с. – ISBN: 978-5-7695-3767-7.
2. Дудник П. И., Кондратенков Г. С., Татарский Б. Г., Ильчук А. Р., Герасимов А. А. Авиационные радиолокационные комплексы / под ред. П. И. Дудника. – М.: ВВАИ имени проф. Н. Е. Жуковского, 2006. – 1112 с. – ISBN: 5-903111-15-7.
3. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: Теория и применение: пер. с англ. / под ред. В.С. Кельзона. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
4. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Корреляционные и спектральные характеристики радиолокационного фазоманипулированного сигнала с плавным изменением фазы // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – №4. – С. 7–13. – EDN: PDXVON.
5. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Обнаружение фазоманипулированных сигналов с плавным изменением фазы при приеме на фоне шума // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55. – № 1. – С. 55–60.– EDN: PAJCAD.

УДК 621.391

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Суслин А.В., канд. техн. наук, ORCID 0009-0007-0800-2202,
Куркин Н.Р.
ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
510323@list.ru

Введение. Последовательности максимальной длины (М-последовательность) это псевдослучайная бинарная последовательность, формируемая регистром сдвига с линейной обратной связью. Обладают хорошими корреляционными свойствами, нашли широкое применение в радиосвязи и радиолокации.

Цель исследование особенностей формирования последовательности максимальной длины в среде программирования Python.

Основная часть. В радиолокации последовательности максимальной длины могут применяются для расширения спектра зондирующего сигнала [1-4].

Листинг программы в среде программирования Python представлен ниже.

```python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
    # Примитивные полиномы (отводы обратной связи) для m = 2..10
    # Записаны как список номеров отводов (1-based), включая последний разряд
    TAPS = {
       2:  [2, 1],
       3:  [3, 2],
       4:  [4, 3],
       5:  [5, 3],
       6:  [6, 5],
       7:  [7, 6],
       8:  [8, 6, 5, 4],
       9:  [9, 5],
       10: [10, 7],
    }
     def m_sequence(m, taps=None, seed=None):
       """
       Формирует M-последовательность длиной N = 2^m – 1.
       m     – число разрядов регистра
       taps  – список отводов (1-based). Если None – берётся из таблицы.
        seed  – начальное состояние регистра (список 0/1, длина m). По умолчанию все единицы.
       Возвращает: seq (0/1), seq_bip (биполярная +1/-1)
       """
       if taps is None:
          if m not in TAPS:
                raise ValueError(f"Нет примитивного полинома для m={m}. Доступны: {sorted(TAPS)}")
          taps = TAPS[m]
       N = 2**m – 1
       if seed is None:
          reg = [1] * m
       else:
          reg = list(seed)
          if len(reg) != m:
             raise ValueError(f"seed должен содержать {m} элементов")
       seq = np.zeros(N, dtype=int)
       for n in range(N):
          seq[n] = reg[-1]                  # выход – последний разряд
          fb = 0
          for t in taps:
             fb ^= reg[m – t]               # отводы
          reg = [fb] + reg[:-1]              # сдвиг вправо
```

```
    seq_bip = 1 – 2 * seq                    # 0 -> +1, 1 -> -1
    return seq, seq_bip
def mseq_signal(m, f_chip=1000, f_carrier=10000, fs=200000, A=1.0):
    """
    Формирует ФМн-сигнал с М-последовательностью.
    """
    seq, seq_bip = m_sequence(m)
    N = len(seq)
    phases = np.where(seq_bip > 0, 0.0, np.pi)
     Tchip = 1 / f_chip
    T = N * Tchip
    t = np.arange(0, T, 1/fs)
    k = np.floor(t / Tchip).astype(int)
    k = np.clip(k, 0, N – 1)
     s = A * np.cos(2 * np.pi * f_carrier * t + phases[k])
    return t, s, seq, seq_bip, phases
if __name__ == "__main__":
    m = 5                        # N = 31
    seq, seq_bip = m_sequence(m)
     print(f"М-последовательность: m = {m}, N = {2**m – 1}")
    print("Биты:", ".join(map(str, seq)))
    print("Биполярная:", seq_bip.tolist())
     t, s, _, _, _ = mseq_signal(m, f_chip=1000, f_carrier=10000, fs=200000)
     plt.figure(figsize=(10, 6))
     plt.subplot(2, 1, 1)
    plt.step(np.arange(len(seq)), seq, where='post')
    plt.ylim(-0.2, 1.2)
    plt.title(f"М-последовательность, m={m}, N={2**m-1}")
    plt.xlabel("Номер чипа")
    plt.ylabel("Бит")
    plt.grid(True)
     plt.subplot(2, 1, 2)
    plt.plot(t * 1e3, s)
    plt.title("ФМн-сигнал с М-последовательностью")
    plt.xlabel("Время, мс")
    plt.ylabel("s(t)")
    plt.grid(True)
     plt.tight_layout()
    plt.show()
```

Результат моделирования представлен на рисунке.

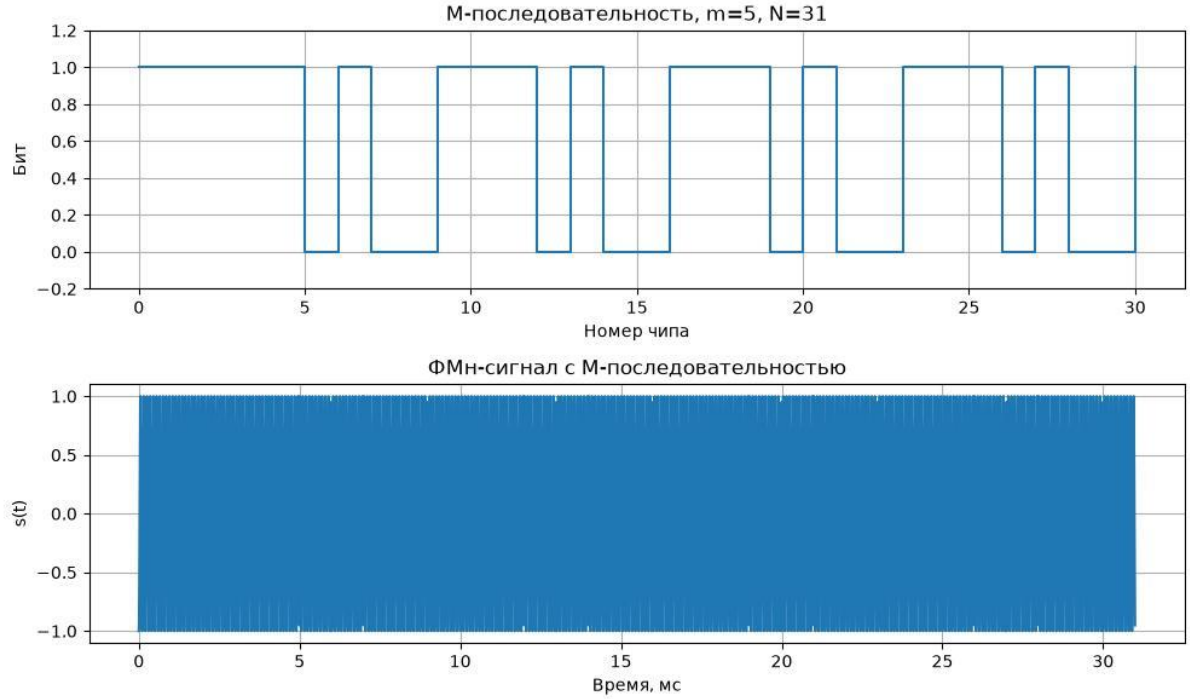


Рис. Результат моделирования

Заключение. Таким показана возможность моделирования на языке программирования Python последовательности максимальной длины, для дальнейшего исследования ее характеристик.

Список литературы

1. Радиотехнические системы: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю. М. Казаринов [и др.]; под ред. Ю. М. Казаринова – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 592 с. – ISBN: 978-5-7695-3767-7.
2. Дудник П. И., Кондратенков Г. С., Татарский Б. Г., Ильчук А. Р., Герасимов А. А. Авиационные радиолокационные комплексы / под ред. П. И. Дудника. – М.: ВВАИ имени проф. Н. Е. Жуковского, 2006. – 1112 с. – ISBN: 5-903111-15-7.
3. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: Теория и применение: пер. с англ. / под ред. В.С. Кельзона. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
4. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Корреляционные и спектральные характеристики радиолокационного фазоманипулированного сигнала с плавным изменением фазы // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – №4. – С. 7–13. – EDN: PDXVON.

УДК 623.746.4

РАЗРАБОТКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЕТОМ МУЛЬТИКОПТЕРА ПРИ КАСКАДНОЙ КОМПОНОВКЕ ВИНТОМОТОРНЫХ ГРУПП

***Сушко Т.И.*[1],** канд. техн. наук, доц., ORCID 0009-0008-7877-8425,
***Кожемякин А.Е.*[2], *Кресс А.Н.*[1]**
[1] ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ
[2]ФГБОУВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск, РФ
tane2020102010@mail.ru

Введение. Исследования в области аэродинамики относятся ко времени изобретения и использования баллистических устройств, позволявших дальше и точнее посылать снаряд в цель, начиная от стрел и копий. Настоящее время характеризуется изобретением аппаратов многоразового или условно-многоразового использования, без экипажа (человека-пилота) и способных самостоятельно перемещаться в пространстве для выполнения различных задач с помощью управляющей программы или дистанционного управления диспетчерским центром с человеком-оператором. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) это объекты, которые имеют собственные энергетические подсистемы и двигатели. Дальность полета некоторых моделей, достигает длительности в несколько месяцев, Традиционный подход к проектированию беспилотных летательных аппаратов строится на принципе копланарного (одноплоскостного) размещения двигателей, при котором конструкторы стремятся максимально разнести винты в пространстве для исключения взаимного влияния их спутанных струй. Однако такое расположение двигателей снижает потенциал импульса механического движения мультикоптера и приводит к экстенсивному росту его габаритов [1].

Цель. Цель данной работы – разработка трехмерной модели мультикоптера вертикального взлета с силовой установкой шести электродвигателей, их вращения в вертикально разнесенных плоскостях (каскадная схема), для подъёма грузов массой до 140 кг на высоту 1500 м и управлением его полета посредствам CAD программ с выбором оптимального типа двигателей. Данная модель – гексакоптер каскадного типа, воздушный старт которого осуществляется в условиях ограниченного пространства (площадь зоны старта – 10 м²), вертикального типа со стабилизацией при зависании, компенсировании внешних возмущений (ветер, смещение груза). Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: изучить аэродинамические характеристики гексакоптера при запуске с ограниченных стартовых площадок с вертикальным взлетом. Внести корректировки, выбрать тип, компановку

модели двигателей и их количество. Рассчитать конструкцию карбоновой рамы и балок крепления двигателей. Подобрать компоненты силовой установки (моторы, пропеллеры, аккумуляторы). Разработать систему электромагнитного крепления груза с резервированием. Интегрировать датчики и алгоритмы активной балансировки. Провести расчёты времени полёта, прочности узлов и выбрать оптимальный вариант гексакоптера, соответствующий заданным критериям.

Основная часть. Трехмерные модели крестовины, подкоса, вставки крепления, штанги для крепления и других выше представленных элементов (рисунок) гексакоптера с БПЛА самолетного типа разрабатывались в программном комплексе *SolidWorks* на основе конечно-разностной сетки. Электрические расчеты тяговой силы, дальности полета и имитационное моделирование работы двигателя, проводилось в условно бесплатном веб-сервисе eCalc, предоставляющего услуги по моделированию и оценке проектов радиоуправляемых моделей посредствам онлайн-калькулятора [3]. Математическое моделирование описания основных видов взлета и посадки, современных БПЛА, остается в закрытом доступе, что не позволяет в полной мере в веб-сервисе eCalc учитывать характеристики местности взлетно-посадочных площадок для беспилотных подразделений.



Рис. Трехмерная модель гексакоптера каскадного типа

Посредством моделирования нами рассмотрены несколько моделей работы мультикоптера с шестью двигателями и выбрана оптимальная. Каждая модель (1, 2, 3) учитывала различные конфигурации работы двигателей, что позволяло оценить их влияние на подъемную силу и маневренность аппарата [4, 5]. Модель 1: все шесть двигателей работали одновременно, обеспечивая максимальную подъемную силу и стабильность. Модель 2: использовали только четыре двигателя для запуска. Установили, что данная модель позволит сэкономить энергию и продлить время полета. Модель 3: запуск с использованием двух двигателей в одной плоскости. Данная модель позволит осуществлять маневры в ограниченном пространстве. Анализ всех моделей наглядно показал, что использование всех шести двигателей одновременно обеспечивает максимальную подъемную силу, однако запуск может быть

осуществлен и с использованием только части двигателей, позволяющих адаптироваться к различным условиям. В разработанной модульно-каскадной схеме гексакоптера шесть приводных двигателей пропеллеры T-Motor T1345S (34.5" × 11", карбон) с 10-дюймовыми трехлопастными пропеллерами расположены в двух параллельных горизонтальных плоскостях. За счет строго рассчитанного вертикального шага каскада и радиального смещения осей моторов к центру рамы, проекции плоскостей вращения смежных винтов образуют контролируемую зону перекрытия (перехлёста).

Заключение. Применение рекомендуемых механизмов закрепления переносимых грузов, таких как электромагнитные замки, значительно повысят интенсивность операций подъёма и спуска в любой точке пространства. По – нашему мнению, время на установку, закрепление, сбрасывания груза, станет значительно меньшим в сравнении с аналогичными запусками с механическими или блочно – веревочными подъёмниками, что является одним из важнейших технологических факторов оценки работы мультикоптера вертикального взлета. Таким образом, представленный гексакоптер с оптимальным количеством электродвигателей и закреплением грузов по нашим расчетам, сможет нести полезную нагрузку более 140 кг. Данный факт позволяет рекомендовать его для применения при решении разного вида задач и в любых местностях от суши до моря, при этом построенных площадок не требуется, запуск вертикальный.

Список литературы

1. Булат, П. В. Основы аэродинамики и динамики беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие / П. В. Булат, С. Ю. Дудников, П. Н. Кузнецов. – М.: Спутник+, 2021. – 273 с.
2. Бирюк В. В. Аэродинамика и самолетостроение: учеб. пособие / В. В. Бирюк [и др.]. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 180 с.: ил.
3. eCalc – reliable electric drive simulations. – URL: https://www.ecalc.ch (дата обращения 01.09.2026)
4. Кожемякин, А. Е. Расчет радиуса кривизны полета самолета при переходе к набору вертикальной скорости с учетом тяги двигателя и лобового сопротивления при старте с нулевой скоростью. – Свидетельство о государственной регистрации программы № 2024681669 от 06 сентября 2024 г.
5. Павлов, И. М. Аэродинамика воздушных винтов микро-БПЛА на малых числах Рейнольдса / И. М. Павлов // Авиационная техника. – 2023. – № 2. – С. 45-51.

УДК 621.372

АНАЛИЗ РАДИОПОКРЫТИЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Третьяков И.А., канд. техн. наук, доц.,
Долбещенкова Н.В.*, *Писаренко Э.Д.
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
i.tretiakov@mail.ru

Введение. Развитие систем мобильной связи сопровождается устойчивым ростом требований к качеству и надежности радиопокрытия. Современные стандарты требуют стабильной связи не только на открытых территориях, но и внутри зданий, во дворах жилых комплексов и в других сложных условиях, что является одной из наиболее трудоемких задач в области радиопланирования.

Особую сложность представляет распространение радиоволн в условиях плотной городской застройки. Наличие многоэтажных зданий, сложной архитектуры и замкнутых пространств приводит к значительным потерям сигнала, формированию зон затенения и неравномерности радиопокрытия. В результате даже при наличии базовых станций в непосредственной близости могут наблюдаться участки с низким уровнем сигнала или его полным отсутствием [1-3].

Основная часть. Распространение радиоволн в городской среде представляет собой сложный физический процесс, существенно отличающийся от условий свободного пространства. В реальных условиях сигнал распространяется в среде с большим количеством препятствий, включая здания, сооружения и элементы городской инфраструктуры, что приводит к дополнительным потерям, изменению направления распространения и искажению структуры сигнала.

В качестве практического примера, приближенного к реальным условиям, рассмотрены особенности радиопокрытия в современных жилых районах с плотной многоэтажной застройкой на примере микрорайона №5 Левенцовский в городе Ростов-на-Дону. Выбор данного объекта обусловлен наличием характерной для современных жилых комплексов архитектуры: высотные здания (более 19 этажей), плотная застройка, а также наличие замкнутых дворовых пространств (дворов-колодцев). Подобные условия являются типичными для новых городских районов и оказывают существенное влияние на распространение радиоволн.

Как показано на рисунке, базовые станции размещены преимущественно по периметру жилого массива, тогда как внутренние дворовые пространства остаются экранированными окружающими зданиями.

Несмотря на развернутую инфраструктуру базовых станций сотовой связи, размещенных по периметру района, устойчивое радиопокрытие

внутри дворов и в помещениях зданий не обеспечивается. Об этом свидетельствуют практические наблюдения, опрос местного населения, а также анализ условий в подобных районах. Это связано с особенностями распространения радиоволн в условиях плотной застройки.

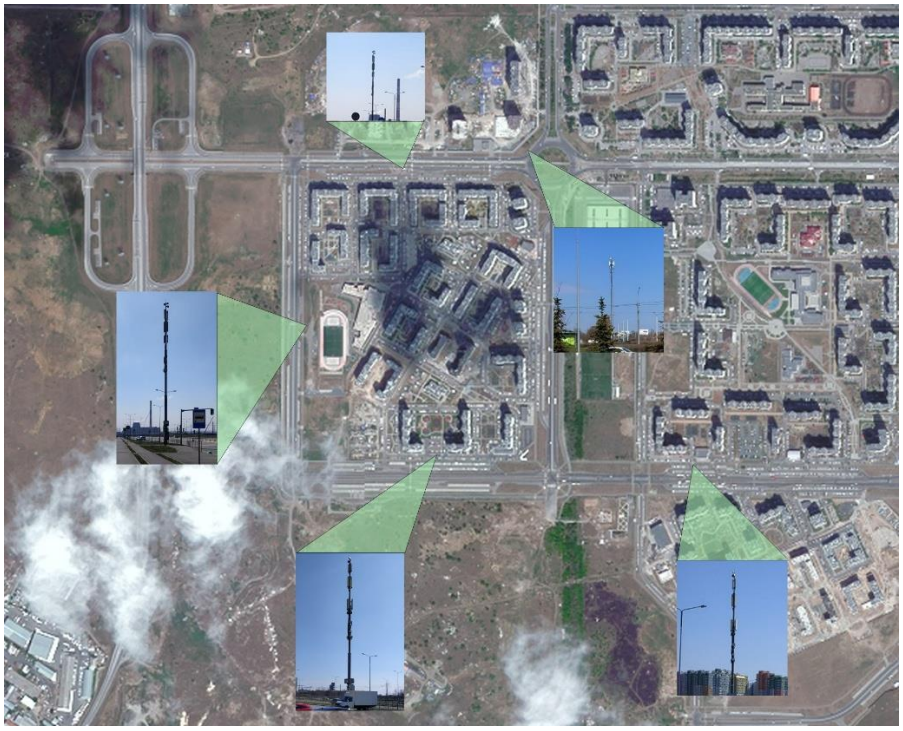


Рис. Пример района с плотной высотной застройкой в г. Ростов-на-Дону с размещением базовых станций сотовой связи по периметру

Основными причинами ухудшения качества связи являются значительное экранирование сигнала железобетонными конструкциями зданий, дополнительные потери при проникновении сигнала внутрь помещений, неблагоприятная геометрия распространения радиоволн, при которой сигнал поступает во двор преимущественно с боковых направлений, многократные отражения и интерференция сигналов, приводящие к формированию зон с пониженным уровнем сигнала.

Для учета данных факторов в модель COST-231 Hata [4] вводятся дополнительные потери:

$$L_{total} = L_{hata} + L_{walls} + L_{yard},$$

где L_{walls} учитывает затухание сигнала при прохождении через стены зданий (20–30 дБ), L_{yard} – дополнительные потери, обусловленные геометрией двора (10–20 дБ).

Для секторной антенны рассчитано значение максимально допустимых потерь, равное 151 дБ. Учитывая высокоэтажную застройку ($L_{walls} \approx 25$ дБ, $L_{yard} \approx 15$ дБ):

$$L_{\max} = 151 - 25 - 15 = 111 \text{ дБ}.$$

Найдем реальную дальность до порога обслуживания для разных частот, используя уравнение модели COST-231 Hata:

900 МГц: $L(d) = 129,02 + 35,23 \cdot \lg(d)$ дБ.

$$d = 10^{\frac{111-129,02}{35,23}} \approx 0,31 \text{ км.}$$

1800 МГц: $L(d) = 139,2 + 35,23 \cdot \lg(d)$ дБ.

$$d = 10^{\frac{111-139,2}{35,23}} \approx 0,16 \text{ км.}$$

Расчеты показывают, что с учетом дополнительных потерь (до 40 дБ) радиус зоны обслуживания базовой станции может уменьшаться в 10–15 раз. В связи с чем возникает необходимость дополнительного анализа распределения уровня сигнала в условиях существующего размещения базовых станций, а также разработки рекомендаций по улучшению радиопокрытия.

Полученные результаты показывают, что даже при малом расстоянии до базовой станции уровень сигнала существенно снижается за счет дополнительных потерь в городской среде. Однако, теоретически, связь всё еще будет доступна на расстоянии меньше 310 м для 900 МГц и 160 м для 1800 МГц. При этом модель COST-231 Hata не учитывает такие факторы, как отсутствие прямой видимости между передатчиком и приемником, экранирование сигналов зданиями, многолучевое распространение и интерференцию.

В условиях дворов-колодцев данные эффекты могут приводить к дополнительному снижению уровня сигнала на 10–20 дБ, что в ряде случаев опускает его ниже порога чувствительности.

Заключение. Таким образом, даже при наличии базовых станций в непосредственной близости (20–50 м) устойчивое радиопокрытие не гарантируется. В условиях плотной городской застройки стандартное размещение базовых станций не обеспечивает требуемого уровня радиопокрытия во внутренних дворовых пространствах.

Список литературы

1. Новиков, А. А. Исследование процессов распространения радиоволн в условиях городской застройки / А. А. Новиков, К. С. Сычев, М. С. Михайлов // Современная электродинамика. – 2024. – № 3(11). – С. 4-11. – DOI 10.24412/2949-0553-2024-311-04-11.
2. Тихомиров А. В. Прогнозирование параметров распространения радиоволн в условиях городской застройки при использовании низко расположенных антенн / А. В. Тихомиров, Е. В. Омельянчук, А. Ю. Семенова и др. // Труды МАИ. – 2017. – № 97. – С. 15.
3. Асотов Д. В. Моделирование процессов распространения радиоволн в условиях городской застройки / Д. В. Асотов, В. Б. Авдеев, В. А. Сладких и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 4. – С. 4-7. – EDN RABMNV.
4. Попов, В. И. Математические модели и алгоритмы распространения радиоволн в сотовых сетях мобильной связи / В. И. Попов, В. А. Скуднов, А. С. Васильев // Евразийский союз ученых. – 2016. – № 3-3(24). – С. 68-80. – EDN XCMBIX.

УДК 621.372: 65.011.56

АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПО ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ОСОБЕННОСТЯМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Третьяков И.А., канд. техн. наук, доц.,
Кожекина Е.Н.*, *Гончаров С.А.
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
i.tretiakov@mail.ru

Введение. В современных условиях стремительного роста числа беспроводных устройств и расширения спектра их применения вопросы контроля радиообстановки и идентификации источников радиоизлучения приобретают особую актуальность [1, 2]. Широкое распространение получили устройства, работающие в нелицензируемых диапазонах частот 2,4 ГГц и 5,8 ГГц – в частности, Wi‑Fi‑оборудование и беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Эти диапазоны характеризуются высокой плотностью радиосигналов, что усложняет их мониторинг, повышает риски несанкционированного использования радиочастотного спектра и создаёт потенциальные угрозы информационной безопасности.

Современные БПЛА и Wi-Fi-устройства работают в одинаковых диапазонах частот и используют схожие методы модуляции и передачи данных, включая OFDM и QAM. В этих условиях особую актуальность приобретает технология идентификации радиоэлектронных средств по индивидуальным особенностям их излучения (SEI) [3]. Современные методы глубокого обучения позволяют эффективно извлекать и классифицировать такие особенности даже в сложной электромагнитной обстановке, например в условиях помехам от Wi-Fi, Bluetooth и других источников. Применение программно‑определяемых радиоустройств (SDR) открывает возможности для разработки относительно недорогих систем пассивного мониторинга и идентификации БПЛА [4].

Основная часть. Разрабатываемая система идентификации радиоэлектронных средств по индивидуальным особенностям излучения представляет собой многоуровневую программно‑аппаратную платформу, реализующую полный цикл обработки радиосигнала – от его приёма до принятия решения о принадлежности сигнала конкретному устройству.

Экспериментальные исследования в рамках работы проводятся на сигналах Wi‑Fi‑устройств и беспилотных летательных аппаратов, функционирующих в диапазонах 2,4 ГГц и 5,8 ГГц. Использование двух типов радиоэлектронных средств позволяет исследовать особенности идентификации как в условиях стационарного радиоканала, характерного для Wi‑Fi‑сетей, так и в условиях динамического радиоканала БПЛА.

Архитектура системы включает несколько взаимосвязанных этапов обработки сигнала: приём радиосигнала, предварительную обработку, выделение признаков, классификацию и принятие решения о принадлежности сигнала конкретному устройству.

На первом этапе осуществляется приём радиосигнала с помощью SDR HackRF One Portapack H2 (рис.). Устройство настраивается на требуемую центральную частоту и выполняет преобразование принимаемого сигнала в цифровую форму.



Рис. Внешний вид SDR HackRF One Portapack H2

Результатом работы приёмной подсистемы является поток комплексных I/Q‑отсчётов, содержащих информацию об амплитудных и фазовых характеристиках сигнала. Использование I/Q‑данных позволяет анализировать спектральные и временные особенности сигнала, необходимые для выделения радиочастотного «отпечатка» устройства.

После приёма сигнала выполняется этап предварительной обработки. Основной задачей данного этапа является повышение качества данных и снижение влияния радиоканала на наблюдаемые характеристики сигнала.

В процессе предварительной обработки выполняется полосовая фильтрация сигнала, позволяющая выделить полезную часть спектра и подавить внеполосные помехи. Далее осуществляется нормализация амплитуды, необходимая для уменьшения влияния расстояния до передатчика и изменения мощности сигнала.

Особое внимание уделяется компенсации частотного сдвига. Для сигналов БПЛА данный этап особенно важен, поскольку движение летательного аппарата вызывает доплеровское смещение частоты и изменение фазовой структуры сигнала.

Также выполняется подавление шумов, устранение постоянной составляющей, временная синхронизация и сегментация сигнала с выделением информативных участков передачи.

После завершения предварительной обработки выполняется этап выделения признаков сигнала. На данном этапе формируется вектор характеристик, описывающий индивидуальные особенности излучения конкретного устройства.

В качестве признаков могут использоваться параметры фазового шума, нестабильность частоты генератора, характеристики переходных процессов, статистические параметры амплитуды и фазы, уровень интермодуляционных искажений, показатели I/Q‑несбалансированности и особенности спектральной структуры сигнала.

Неотъемлемым элементом системы является база данных RF fingerprints. В базе данных хранятся обучающие и тестовые выборки сигналов Wi Fi устройств и БПЛА, а также информация об условиях приёма, параметрах записи и типе исследуемого устройства. Наличие базы данных позволяет выполнять обучение классификаторов, проводить сравнительный анализ сигналов и оценивать устойчивость системы идентификации в различных условиях электромагнитной обстановки.

Заключение. Таким образом, разработанная архитектура автоматизированной системы идентификации радиоэлектронных средств по индивидуальным особенностям излучения обеспечивает возможность исследования и сравнения радиочастотных «отпечатков» Wi-Fi устройств и БПЛА в условиях реальной электромагнитной обстановки. Использование SDR HackRF One Portapack H2 позволяет реализовать гибкую программно-аппаратную платформу для решения задач радиомониторинга и идентификации радиоэлектронных средств.

Список литературы

1. Третьяков И. А. Элементы автоматизированных систем научных исследований радиоэлектронной обстановки / И. А. Третьяков, М. В. Бабичева, Я. И. Рушечников и др. // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 3(38). – С. 172-181. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-172-181. – EDN HKDOZN.
2. Студеникин, А. Г. Алгоритм выбора подлежащих идентификации радиоканалов на основе истории контроля / А. Г. Студеникин, А. Б. Токарев, И. С. Фаустов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 6. – С. 85-93. – DOI 10.36622/VSTU.2023.19.6.013. – EDN EBJHXA.
3. Chen, X. Specific emitter identification based on joint variational mode decomposition / X. Chen, W. Xu, Y. Wang // 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall). – IEEE, 2024. – P. 1-6.
4. Семенюк А. В. Обеспечение информационной безопасности через анализ радиоэлектронной обстановки беспилотного летательного аппарата с помощью программного обеспечения SDR-приемника / А. В. Семенюк, И. В. Сычев, Ю. В. Алферов [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2020. – Т. 1. – С. 104-108. – EDN WISGDF.

УДК 621.396.93:004.738

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СМАРТФОНОВ НА ANDROID И iOS В КАЧЕСТВЕ WI-FI РАДИОСТАНЦИЙ

Чекашов Р.М., Гатин К.Р.,
Авксентьев А.А., канд. техн. наук, доц., ORCID 0009-0003-2131-4690
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева», г. Казань, РФ
rchemod@mail.ru

Введение. Сотовая связь и Интернет есть не везде: их может не быть в походе, под землёй, на большой территории предприятия или при аварии. Небольшой группе людей в таких условиях нужна простая связь на короткое расстояние. Обычно для этого берут рации, но их нужно покупать заранее. Смартфон же есть почти у каждого, и в нём уже есть радиомодуль Wi-Fi [1, 2].

Цель работы – показать, как с помощью бесплатных приложений сделать из смартфонов на Android и iOS рации, которые работают по Wi-Fi без сотовой сети и Интернета. Рассмотрены все сочетания: Android – Android, iOS – iOS и Android – iOS, а также случай, когда смартфонов три.

Основная часть. Идея простая. Смартфоны соединяются между собой по Wi-Fi, а приложение работает как рация: нажал кнопку «Push-to-talk» («нажми и говори») – говоришь, отпустил – слушаешь. Говорить и слушать одновременно нельзя. Такая связь называется симплексной, и это максимум, что дают рассматриваемые приложения.

Android и iPhone соединяются по Wi-Fi по-разному и напрямую друг друга «не видят». Поэтому для каждого сочетания смартфонов нужен свой способ (таблица).

Таблица

Варианты организации связи

Смартфоны	Приложения и где их скачать	Как соединяются
Android – Android	Mumla (Google Play), Termux (F-Droid)	один смартфон раздаёт Wi-Fi и работает сервером
iOS – iOS	Walkie Talkie Offline (App Store)	напрямую, без сети и сервера
Android – iOS	на Android: Mumla, Termux; на iPhone: Mumble (App Store)	Android раздаёт Wi-Fi и работает сервером

Все приложения бесплатные. Mumla (для Android) и Mumble (для iPhone) – это рации, которые работают через общий сервер и совместимы друг с другом [3]. Сервер – это программа, которая принимает голос от одного смартфона и передаёт его остальным. Она запускается на Android в приложении Termux. Termux нужно скачивать из каталога F-Droid, так как версия в Google Play устарела. Схема связи показана на рис.

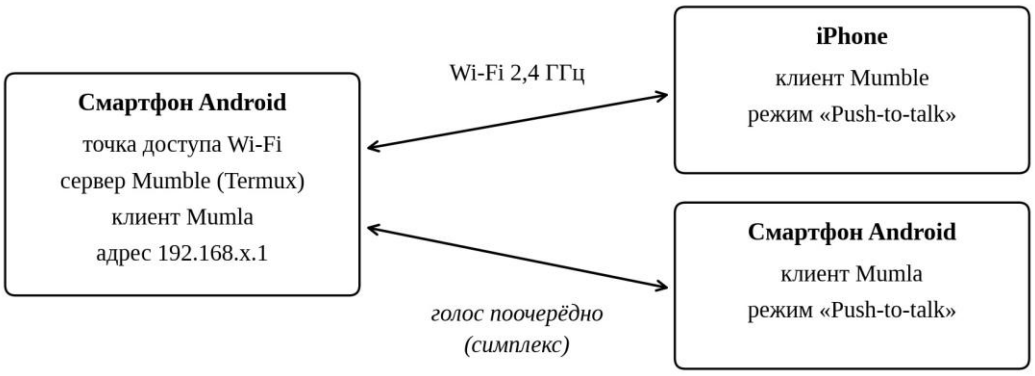


Рис. Схема связи смартфонов Android и iOS

Вариант 1: Android – Android. Настройка выполняется по шагам:

1) на первом смартфоне включить раздачу Wi-Fi: Настройки → Сеть и Интернет → Точка доступа и модем → Точка доступа Wi-Fi; задать имя сети и пароль;

2) на этом же смартфоне открыть Termux и по очереди ввести команды pkg install x11-repo, pkg install mumble-server и mumble-server -fg. Первые две команды выполняются один раз и заранее, пока есть Интернет; третья запускает сервер;

3) командой ifconfig узнать адрес первого смартфона в сети (обычно 192.168.x.1);

4) второй смартфон подключить к этой сети Wi-Fi, как к обычному роутеру;

5) на обоих смартфонах открыть Mumla и добавить сервер: адрес первого смартфона (на нём самом – 127.0.0.1), порт 64738, любое имя;

6) в настройках Mumla выбрать режим «Push-to-talk». После этого можно разговаривать.

Вариант 2: iOS – iOS. Здесь всё проще: сеть Wi-Fi и сервер не нужны. На оба iPhone из App Store устанавливается Walkie Talkie Offline. На первом iPhone выбирается режим «Advertise» (ждать подключения), на втором – «Browse» (искать). Второй iPhone находит первый, и его нужно выбрать в списке. Приложению нужно разрешить доступ к микрофону.

Вариант 3: Android – iOS. Android-смартфон раздаёт Wi-Fi и запускает сервер так же, как в варианте 1 (шаги 1–3). iPhone подключается к этой сети: Настройки → Wi-Fi. Сообщение «Нет подключения к Интернету» – это нормально. В приложении Mumble на iPhone добавляется сервер: адрес Android-смартфона, порт 64738, любое имя. В настройках включается «Push-to-talk». При первом запуске нужно разрешить доступ к микрофону и локальной сети.

Связь работает на расстоянии в несколько десятков метров в помещении и до 100–150 м на открытом месте.

Перед использованием связь стоит проверить заранее: установить приложения, пока есть Интернет, зарядить смартфоны и договориться об

именах абонентов. На смартфоне-сервере нельзя закрывать Termux, иначе сервер остановится.

Если смартфонов три. В вариантах 1 и 3 третий смартфон добавляется так же, как второй: он подключается к той же сети Wi-Fi и к тому же серверу. Это может быть и Android, и iPhone. Все три абонента попадают в один канал, и получается общий разговор: когда один говорит, двое других слышат его одновременно. Говорить по-прежнему нужно по очереди: если двое нажмут кнопку сразу, третий услышит оба голоса вперемешку. На сервере можно создать и два канала, тогда двое смогут разговаривать отдельно от третьего.

Пример такой группы показан на рис. 1: первый Android-смартфон раздаёт Wi-Fi и держит сервер, второй Android-смартфон подключается к нему через Mumla, а iPhone – через Mumble. Все трое слышат друг друга, хотя у них разные операционные системы.

Нужно учитывать, что весь голос идёт через смартфон-сервер. Поэтому его лучше держать в середине группы: каждый из двух остальных должен быть в зоне его Wi-Fi, а друг от друга они могут находиться вдвое дальше. Смартфон-сервер быстрее разряжается, и если он выключится, связь пропадёт у всех. Так же подключаются четвёртый и следующие смартфоны; обычно точка доступа принимает до 8–10 устройств.

В варианте 2 приложение прямой связи рассчитано прежде всего на пару iPhone. Для трёх iPhone надёжнее добавить один Android-смартфон как точку доступа и сервер и подключить все iPhone через Mumble, как в варианте 3.

Заключение. Смартфоны на Android и iOS в любом сочетании можно использовать как Wi-Fi рации без сотовой сети, Интернета и дополнительного оборудования. Для двух iPhone достаточно одного приложения, а если в группе есть Android-смартфон, на нём создаются точка доступа и сервер, к которому подключаются три и более абонентов. Связь при этом симплексная, как у обычной рации, чего достаточно для переговоров небольшой группы на коротких расстояниях.

Список литературы

1. Авксентьев, А. А. Сети и системы связи: учебное пособие / А. А. Авксентьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 336 с. – ISBN 978-5-9729-1588-0.
2. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 5-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2016. – 992 с.
3. Mumble: Open Source, Low Latency, High Quality Voice Chat. – Текст: электронный // Mumble: официальный сайт. – URL: https://www.mumble.info (дата обращения: 05.10.2026).

УДК 621.313.333.018

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Шелехова О.Г., канд. техн. наук, доц., ORCID 0009-0005-7930-1184
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ
jenjaistorik@mail.ru

Введение. Ежегодная повреждаемость асинхронных двигателей (АД) составляет 20–25 % от общего количества установленных электродвигателей [1]. Это приводит к нарушению непрерывности технологических процессов, браку продукции, а также к затратам на восстановление и ремонт электродвигателей [2]. Анализ статистических данных показывает, что до 80% всех случаев отказа двигателей обусловлены различными инцидентами, связанными с сетевым напряжением [2]. Из этого числа до 60% приходится на проблемы, вызванные отклонениями в уровне питающего напряжения [2].

Согласно [3] отклонения питающего напряжения могут превышать номинальное значение на 10 % и более. Влияние отклонения питающего напряжения на эксплуатационные характеристики АД рассмотрено в работах отечественных и зарубежных авторов [1, 2, 4–6]. Прогнозирование срока службы АД выполняется по известным токам и температурам в элементах конструкции АД [5, 6], предварительный расчет, которых трудоемок [5, 6], что затрудняет их использование при необходимости срочного принятия решения.

Цель работы – разработка нового подхода к прогнозированию срока службы асинхронного двигателя при отклонении питающего напряжения.

Основная часть. В ходе проведенных ранее исследований [7], автором уточнено аналитическое выражение для определения коэффициента сопротивления ($K^*_{R\min}$). В результате обосновано [7], что величина $K^*_{R\min}$ может быть использована в качестве критерия для оценки токов и тепловых нагрузок в элементах конструкции АД при отклонении напряжения сети, которые являются исходными значениями для определения срока службы электродвигателя [7].

Автором выполнена сравнительная оценка срока службы электродвигателей различной мощности с разными значениями $K^*_{R\min}$. (табл.) при отклонении питающего напряжения.

В качестве примера в табл. представлены значения срока службы АД для асинхронных электродвигателей с различными значениями коэффициента сопротивления ($K^*_{R\min}$). Согласно ГОСТ 32144-2013 [8] при длительно допустимом значении отклонении напряжения ± 5 % относительное значения питающего напряжения составляет U^*_{np} =

(0.95÷1.05). В этом случае срок службы АД может сократиться в 2.5 и более раз (табл.). Например (табл.), при напряжении $U^*_{пр}$ = 0.95 для АД с коэффициентами сопротивления 0.5; 0.9; 2.3 срок службы сократится в 1.38; 1.50; 2.65 раза соответственно.

Таблица

Срок службы АД с различными значениями критерия $K^*_{R\min}$ при различных значениях питающего напряжения ($U^*_{пр}$)

$K^*_{R\min}$	$U^*_{пр}$						
	0.8	0.9	0.95	1.0	1.05	1.1	1.2
0.5	0.13	0.41	0.72	1.00	0.80	0.52	0.20
0.9	0.06	0.36	0.67	1.00	1.00	0.99	0.67
1.2	0.03	0.26	0.61	1.00	1.01	1.03	1.03
2.3	0.001	0.12	0.38	1.00	1.04	1.12	1.20

При снижении напряжения прямой последовательности до $U^*_{пр}$ = 0.9 срок службы сокращается в 2.44; 2.63; 8.3 раза для АД с коэффициентами сопротивления 0.5; 0.9; 2.3 соответственно. Таким образом (рис.), асинхронным электродвигателям с более низким значением коэффициента сопротивления соответствует более интенсивное сокращение срока службы при снижении напряжения сети.

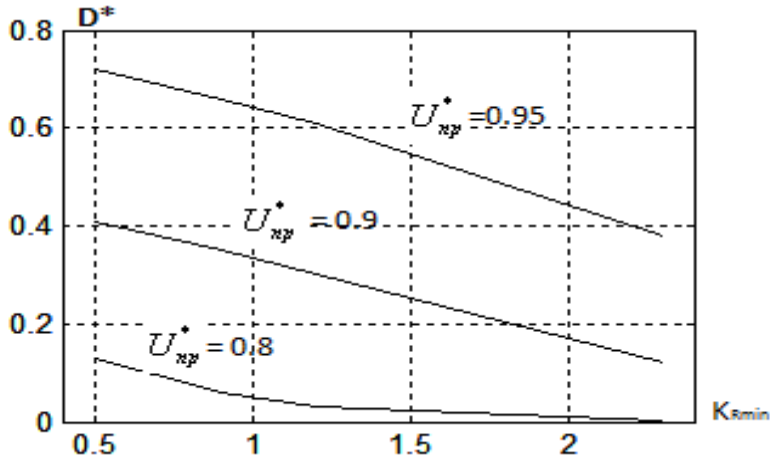


Рис. Срок службы АД с различными значениями критерия $K^*_{R\min}$ при снижении питающего напряжения ($U^*_{пр}$)

Повышение напряжения прямой последовательности сопровождается более интенсивным сокращением срока безаварийной эксплуатации АД с более низким коэффициентом сопротивления (табл.).

Из выше изложенного следует, что при эксплуатации в условиях пониженного питающего напряжения выбор асинхронного двигателя с более высоким значением коэффициента сопротивления позволяет существенно увеличить срок безаварийной эксплуатации электродвигателя. Проделанный анализ свидетельствует о достоверности разработанного подхода.

Заключение. Таким образом, использование коэффициента сопротивления позволяет прогнозировать срок службы асинхронного двигателя при отклонении питающего напряжения. Полученные результаты могут быть использованы создании алгоритмов работы защитных устройств АД от тепловых перегрузок, а также при выборе АД в условиях отклонения питающего напряжения.

Список литературы

1. Рясков, Ю. И. Обзор видов защиты асинхронных двигателей, используемых в энергетических системах и комплексах / Ю. И. Рясков, Н. М. Шайтов, А. В. Горпинченко // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 107 –115.
2. Романова, В. В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей / В. В. Романова, К. В. Суслов, С.В. Хромов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2021. – Т. 23, № 3. – С. 80 – 89. DOI:10.30724/1998-9903-2021- 23-3-80-89.
3. Приказ от 12.07.2018 г. N 548 Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики" – http://nvol.gosnadzor.ru/activity/control /energonadzor/pr548.pdf
4. Метельков, В. П. Влияние ограничений по нагреву и просадке напряжения на пусковые режимы асинхронных электроприводов / А. М. Зюзев, В. П. Метельков, Д. П. Степанюк // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник; Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 172−177.
5. Федоров, М. М., Алексеев, Е. Р. Тепловое состояние асинхронных двигателей при изменении напряжения сети // Збірник наукових праць ДонДТУ, серія: «Електротехніка и енергетика».− Вип. 17. − Донецьк, ДонДТУ. − 2000. − С. 82−86.
6. Федоров, М. М. Динамические тепловые модели узлов электрических машин / М. М. Федоров // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 53. – С. 70–73.
7. Шелехова, О. Г. Метод определения минимального уровня тока статора асинхронного двигателя при изменении питающего напряжения / О. Г. Шелехова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2026. – № 1. – С. 225-232. – DOI 10.5281/zenodo.19202040. – EDN IZAZLE.
8. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – 16 с.

УДК 004.056:004.451

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕР УСИЛЕНИЯ ЗАЩИЩЁННОСТИ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ СЕМЕЙСТВА LINUX НА ИНДЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АУДИТА LYNIS

Шкуренков Е.С., ORCID 0009-0003-0083-3547,
Шишов О.А., ORCID 0009-0009-8750-4781
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, РФ
egorskurenkov391@gmail.com, shishov.o@gubkin.ru

Введение. Обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности информации начинается с защищённой конфигурации узлов, на которых она обрабатывается [1]: ошибки конфигурации создают условия для деструктивных действий в информационной системе [2]. Для их выявления применяются автоматизированные аудиторы конфигурации. Один из распространённых – открытый сканер Lynis, который выполняет более двухсот проверок и формирует индекс защищённости по шкале от 0 до 100 и перечень рекомендаций; его применимость к отечественному дистрибутиву ALT Linux показана ранее [3]. Вместе с тем универсальные средства аудита систематически ограничены при интерпретации специфичных механизмов защиты отечественных ОС [4], а вопрос о том, насколько индекс различает системы и как он откликается на конкретные меры, остаётся открытым.

Цель работы – количественно оценить вклад типовых мер усиления защищённости в индекс Lynis для отечественного и зарубежного дистрибутивов Linux.

Основная часть. Аудит выполнялся средством Lynis версии 3.1.7 в режиме «audit system» внутри изолированных контейнеров Docker. Контейнерная среда обеспечивает воспроизводимость: каждое измерение начинается с чистого базового образа. Исследованы образы шести дистрибутивов: ALT p10, ALT p11, Debian 12, Ubuntu 24.04, Rocky Linux 9 и Fedora 40 (загружены 28.09.2026). Для Debian 12 и ALT p11 оценены два уровня мер. Уровень 1 – только изменение конфигурации: срок действия паролей, маска создания файлов 027 и число раундов хеширования паролей, запрет дампов памяти, запрет загрузки модулей неиспользуемых сетевых протоколов (DCCP, SCTP, RDS, TIPC) и USB-накопителей, предупреждающие баннеры. Уровень 2 – уровень 1 плюс установка обновлений и средств защиты: модуля проверки сложности паролей, средств контроля целостности (AIDE) и поиска руткитов (rkhunter), подсистем учёта процессов и аудита. Сравнение проводилось по формализованным критериям, как это принято при оценке применимости открытых инструментов [5].

Исходные индексы всех шести образов лежат в диапазоне 60–62, т. е. по интегральному индексу базовые системы практически неразличимы, хотя состав рекомендаций у них различается: так, в образах Debian и Ubuntu Lynis выявил пакеты с известными уязвимостями. Результаты применения мер приведены в таблице.

Таблица

Индекс Lynis и число находок при разных уровнях мер

Дистрибутив	**Показатель**	**Исходный образ**	**Уровень 1**	**Уровень 2**
Debian 12	Индекс	60	69	76
	Рекомендации	32	19	14
	Предупреждения	2	2	2
ALT p11	Индекс	62	72	76
	Рекомендации	25	13	11
	Предупреждения	1	1	3

Меры уровня 1, не требующие установки программного обеспечения, повышают индекс на 9 пунктов для Debian 12 и на 10 для ALT p11, что составляет 56 и 71 % итогового прироста. С точки зрения экономической эффективности [6] именно они должны выполняться в первую очередь. Установка средств защиты добавляет ещё 7 и 4 пунктов, но одновременно порождает новые находки: предупреждения о ненастроенной базе контроля целостности AIDE и рекомендацию ограничить доступ к компиляторам, попавшим в систему как зависимости; в ALT p11 число предупреждений выросло с 1 до 3. Индекс вознаграждает наличие средства, а не его настройку.

Даже после обоих уровней индекс не превысил 76. Из 14 оставшихся видов находок для Debian 12 и 12 для ALT p11 соответственно 7 и 6 относятся к уровню хоста: размещение каталогов на отдельных разделах, параметры ядра, загрузка, работа служб журналирования и аудита. Эти находки устраняются только на реальном узле, поэтому индекс, полученный для образа, характеризует его конфигурацию, но не защищённость развёрнутой системы.

Полученные результаты согласуются со сценарной оценкой [4], в которой аудитор конфигурации корректно отражал классические механизмы Linux, но не интерпретировал мандатные атрибуты и режим замкнутой программной среды Astra Linux. Поэтому близкие значения индекса отечественного и зарубежного дистрибутивов не означают равенства их защитных возможностей.

Из результатов следует порядок применения автоматизированного аудита. Сначала фиксируется перечень находок, а не только индекс. Затем применяются меры конфигурации, дающие основной прирост при минимальных затратах. Средства защиты устанавливаются вместе с обязательной начальной настройкой (например, инициализацией базы

контроля целостности), после чего аудит повторяется, а новые находки разбираются отдельно. Окончательная оценка выполняется на развёрнутом узле, где доступны проверки уровня хоста, и периодически повторяется.

Заключение. Интегральный индекс Lynis слабо различает базовые образы дистрибутивов, но чувствителен к мерам усиления: более половины прироста дают изменения конфигурации, не требующие затрат на программное обеспечение, тогда как установка средств защиты без их настройки добавляет новые находки. Для отечественных ОС индекс следует дополнять перечнем находок и проверкой штатных механизмов защиты, которые универсальный аудитор не интерпретирует [4]. Дальнейшая работа – повторение измерений на развёрнутых узлах, включая Astra Linux.

Список литературы

1. Мельников, В. А. Исследование существующих методов и технологий обеспечения защищенной передачи информации / В. А. Мельников // Цифровое общество: образование, экономика, технологии: Материалы III Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 18–19 марта 2025 года. – Москва: ООО «Актуальность.РФ», 2025. – С. 299-304. – EDN OYPKNT.
2. Мельников В. А. Подходы к выявлению деструктивных действий и событий в информационных системах / В. А. Мельников, П. Ю. Пушкин, А. А. Мельникова [и др.] // Системы высокой доступности. – 2026. – Т. 22, № 3. – С. 112-125. – DOI 10.18127/j20729472-202603-10.
3. Мельников, В. А. Инструменты для аудита безопасности на ALT Linux на примере Lynis / В. А. Мельников, А. А. Першина // Глобальные научные тренды: междисциплинарные исследования: Сборник статей II Международной научно-практической конференции, Саратов, 25 марта 2025 года. Часть 1. – Саратов: ООО Издательство «Кубик», 2025. – С. 90-102. – EDN DBAKYT.
4. Хуранова, К. М. Сценарная оценка применимости инструментов мониторинга целостности и анализа поверхности атаки в ОС Astra Linux / К. М. Хуранова, С. А. Резниченко // Безопасность информационных технологий. – 2026. – Т. 33, № 4. – С. 128-142. – DOI 10.26583/bit.2026.4.11.
5. Мельников, В. А. Анализ применимости открытых инструментов работы с алгоритмами Data Mining для решения задач анализа экономических данных / В. А. Мельников, А. А. Першина, Н. А. Савченко // Актуальные проблемы нефти и газа: Сборник трудов VII Всероссийской молодежной научной конференции, Москва, 16–18 октября 2024 года. – Москва: Институт проблем нефти и газа РАН, 2024. – С. 360-361. – EDN UIKEBJ.
6. Мельников, В. А. Анализ современных методик оценки экономической эффективности цифровой трансформации / В. А. Мельников, А. А. Мельникова // Цифровое общество: образование, экономика, технологии: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 18–19 марта 2026 года. – Москва: ООО «Актуальность.РФ», 2026. – С. 188-194. – EDN NGHSYH.

УДК 004.056

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗНАЧИМОГО ОБЪЕКТА КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ СВЁРТКИ РАЗНОРОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Шкуренков Е.С., ORCID 0009-0003-0083-3547,
Шишов О.А., ORCID 0009-0009-8750-4781
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, РФ
egorskurenkov391@gmail.com, shishov.o@gubkin.ru

Введение. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» в редакции, действующей с 01.09.2025, ввёл отраслевые перечни объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ), а постановление Правительства Российской Федерации от 08.02.2018 № 127 сохранило три категории значимости и пять групп показателей возможного ущерба. Основную опасность для значимых объектов представляют деструктивные воздействия на информационные системы, ведущие к нарушению конфиденциальности, целостности и доступности информации [1, 2], причём нарушитель нередко обходит технический периметр через персонал методами социальной инженерии [3].

Методика оценки угроз безопасности информации ФСТЭК России от 05.02.2021 даёт по каждому сценарию бинарный ответ «угроза актуальна / неактуальна» и не формирует сопоставимой меры риска, не обосновывая очерёдность защитных вложений. Параметрические модели риска значимых объектов КИИ формируют агрегаты рисков [4], но не различают показатели по способности компенсировать друг друга и не связывают порог приемлемости с категорией значимости. Цель работы – модель единого индекса риска, учитывающая оба обстоятельства.

Основная часть. Состояние объекта описывается тремя группами показателей, нормированных к отрезку [0; 1]: p_j – возможность реализации угроз (возможности нарушителя и сценарии по методике ФСТЭК России), s_j – защищённость (полнота мер по приказу ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239, обнаружение и реагирование, резервирование), u_j – тяжесть последствий по группам ущерба постановления № 127. Показатели защищённости могут заполняться по результатам инструментального аудита конфигурации узлов [5]. Веса w_j, v_j, z_j внутри групп определяются методом анализа иерархий Т. Саати при отношении согласованности не более 0,1.

Показатели возможности реализации угроз взаимозаменяемы (изоляция объекта от внешних сетей действительно ослабляет высокий уровень возможностей нарушителя), поэтому для них применяется аддитивная свёртка:

$$P = \Sigma\, w_{\mathbf{j}}\, p_{\mathbf{j}}. \qquad (1)$$

Показатели защищённости некомпенсируемы: полнота мер не восполняет отсутствия обнаружения вторжений, поэтому применяется мультипликативная свёртка, резко снижающая результат при низком значении любого сомножителя:

$$S = \Pi\, s_{\mathbf{j}}^{\mathrm{vj}}. \qquad (2)$$

Катастрофический социальный ущерб не уравновешивается умеренным экономическим, поэтому тяжесть последствий свёртывается по Минковскому с параметром $q = 3$, тяготеющим к наибольшему из частных показателей:

$$U = (\, \Sigma\, z_{\mathbf{j}}\, u_{\mathbf{j}}^{\mathrm{q}}\,)^{1/\mathrm{q}}. \qquad (3)$$

Индекс риска сопоставляется с порогом, вдвое ужесточающимся с каждым повышением категории значимости K (1 – наивысшая):

$$R = P\,(1 - S)\,U, \quad R \le R_{\text{доп}}(K), \quad R_{\text{доп}} = 0{,}05;\ 0{,}10;\ 0{,}20. \qquad (4)$$

Условный пример – АСУ ТП насосной станции водоснабжения 2 категории значимости: меры по приказу № 239 реализованы почти полностью, но средства обнаружения вторжений в технологическом сегменте отсутствуют. Исходные данные: p = (0,50; 0,65; 0,30), s = (0,90; 0,20; 0,80), u = (0,80; 0,45; 0,30); все матрицы весов согласованы (ОС ≤ 0,016). Сравнение с аддитивной свёрткой приведено в табл.

Таблица

Сравнение предлагаемой модели с аддитивной свёрткой

Показатель	**Предлагаемая модель**	**Аддитивная свёртка**
Защищённость S	0,6187	0,7194
Тяжесть последствий U	0,6688	0,5943
Индекс риска R (P = 0,5119)	0,1305	0,0854
Решение при пороге 0,10	риск неприемлем	риск приемлем

При одних и тех же данных модели приходят к противоположным решениям: аддитивная свёртка занижает риск на 34,6 %, усредняя высокую полноту мер (0,90) с отсутствием обнаружения (0,20), и признаёт защищённым объект с неработающим контуром обнаружения. Анализ чувствительности показывает, куда направить ресурс: развёртывание средств обнаружения и реагирования (s_2: 0,20 → 0,75) снижает R на 60,1 % (до 0,0520) и выводит объект в допустимую область, тогда как доведение полноты мер до 98 % снижает R лишь на 8,9 % (до 0,1190). Такое сопоставление даёт количественную основу для оценки экономической эффективности защитных мероприятий [6].

Заключение. Предложенная модель согласована по реквизитам с действующими нормативными документами и нормирует порог приемлемости по категории значимости. Раздельная свёртка компенсируемых и некомпенсируемых показателей устраняет систематическое занижение риска, свойственное аддитивным моделям. Ограничения – экспертный характер частных показателей и содержательное, а не статистическое обоснование параметра q и порогов; их калибровка по отраслевым данным об инцидентах составляет направление дальнейшей работы.

Список литературы

1. Мельников, В. А. Исследование существующих методов и технологий обеспечения защищенной передачи информации / В. А. Мельников // Цифровое общество: образование, экономика, технологии: Материалы III Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 18–19 марта 2025 года. – Москва: ООО «Актуальность.РФ», 2025. – С. 299-304. – EDN OYPKNT.
2. Мельников В. А. Подходы к выявлению деструктивных действий и событий в информационных системах / В. А. Мельников, П. Ю. Пушкин, А. А. Мельникова [и др.] // Системы высокой доступности. – 2026. – Т. 22, № 3. – С. 112-125. – DOI 10.18127/j20729472-202603-10.
3. Мельников, В. А. Классификация технологий применения фишинга в качестве метода социальной инженерии / В. А. Мельников, А. А. Першина // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): Тезисы докладов, Москва, 23–27 октября 2023 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2023. – С. 307-308. – EDN VVHDRR.
4. Минзов, А. С. Моделирование рисков информационной безопасности на значимых объектах критической информационной инфраструктуры / А. С. Минзов, С. А. Минзов, Д. С. Годовицина // Вопросы кибербезопасности. – 2026. – № 2(72). – С. 138-148. – DOI 10.21681/2311-3456-2026-2-138-148.
5. Мельников, В. А. Инструменты для аудита безопасности на ALT Linux на примере Lynis / В. А. Мельников, А. А. Першина // Глобальные научные тренды: междисциплинарные исследования: Сборник статей II Международной научно-практической конференции, Саратов, 25 марта 2025 года. Часть 1. – Саратов: ООО Издательство «Кубик», 2025. – С. 90-102. – EDN DBAKYT.
6. Мельников, В. А. Анализ современных методик оценки экономической эффективности цифровой трансформации / В. А. Мельников, А. А. Мельникова // Цифровое общество: образование, экономика, технологии: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 18–19 марта 2026 года. – Москва: ООО «Актуальность.РФ», 2026. – С. 188-194. – EDN NGHSYH.

УДК 004.056:004.85

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ФИШИНГОВЫХ ВЕБ-САЙТОВ ПРИ РАЗНОМ СОСТАВЕ ПРИЗНАКОВ

Шкуренков Е.С., ORCID 0009-0003-0083-3547,
Шишов О.А., ORCID 0009-0009-8750-4781
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, РФ
egorskurenkov391@gmail.com, shishov.o@gubkin.ru

Введение. Фишинг остаётся одним из основных методов социальной инженерии: нарушитель побуждает пользователя перейти на поддельный ресурс и раскрыть учётные или платёжные данные [1]. Посещение такого ресурса относится к деструктивным событиям в информационной системе, которые требуется выявлять до наступления ущерба [2]. Сигнатурные чёрные списки запаздывают относительно появления новых доменов, поэтому развивается классификация сайтов методами машинного обучения; на собственном наборе из более чем 250 тыс. доменов наилучший результат показал случайный лес [3]. Для встраивания классификатора в информационно-аналитическую систему безопасности [4] важна не только итоговая точность, но и то, какие признаки доступны в момент проверки: признаки адресной строки вычисляются сразу по ссылке, а признаки содержимого требуют загрузки страницы.

Цель работы – сравнить распространённые алгоритмы классификации на открытом наборе данных и оценить, насколько сокращение признаков до группы адресной строки снижает качество выявления фишинга.

Основная часть. Использован набор Phishing Websites репозитория UCI [5]: 11 055 записей, 30 признаков в шкале {−1; 0; 1}, доля фишинговых сайтов 44,3 %. Авторы набора делят признаки на четыре группы: адресная строка (12 признаков: IP-адрес вместо имени, длина URL, сервис сокращения ссылок, символ «@», префиксы через дефис, число поддоменов, состояние SSL-сертификата, срок регистрации домена и др.), аномалии запросов, HTML и JavaScript, характеристики домена. Сравнивались два набора: полный (30 признаков) и только адресная строка (12 признаков).

Эксперимент выполнен средствами открытой библиотеки scikit-learn 1.8. Открытые инструменты интеллектуального анализа данных применимы к прикладным задачам наравне с коммерческими [6, 7] и обеспечивают воспроизводимость результата. Оценивались шесть алгоритмов: наивный байесовский классификатор, логистическая регрессия, k ближайших соседей (k = 5), дерево решений, случайный лес (300 деревьев)

и градиентный бустинг. Протокол – стратифицированная 10-кратная перекрёстная проверка. Помимо точности, F1-меры и площади под ROC-кривой учитывалась доля пропусков – доля фишинговых сайтов, отнесённых к легитимным, поскольку именно пропуск ведёт к ущербу. Результаты приведены в таблице.

Таблица

Качество выявления фишинговых сайтов, %

Алгоритм	**Полный набор (30 признаков)**				**Адресная строка (12)**	
	Точность	**F1**	**ROC AUC**	**Пропуски**	**Точность**	**Пропуски**
Наивный байесовский	92,9	92,0	97,9	8,7	89,9	13,3
Логистическая регрессия	94,0	93,2	98,7	7,6	89,8	14,4
k ближайших соседей	94,8	94,1	98,4	6,5	89,4	13,9
Дерево решений	96,6	96,1	97,7	5,0	90,9	12,6
Случайный лес	97,3	96,9	99,6	4,0	90,9	12,3
Градиентный бустинг	96,9	96,4	99,6	4,2	90,9	12,9

На полном наборе лучшие результаты дают ансамблевые методы: случайный лес достигает точности 97,3 % при доле пропусков 4,0 %, градиентный бустинг – 96,9 % и 4,2 %; линейные и вероятностные модели пропускают вдвое больше фишинга (7,6–8,7 %). Это согласуется с выводом [3], полученным на другом наборе данных. Площадь под ROC-кривой у ансамблей составляет 99,6 %, что позволяет дополнительно снизить долю пропусков смещением порога решения ценой роста ложных срабатываний.

Ограничение признаками адресной строки меняет картину качественно. Точность всех шести алгоритмов сжимается в узкий диапазон 89,4–90,9 %, а доля пропусков возрастает до 12,3–14,4 %: у случайного леса – с 4,0 до 12,3 %, т. е. примерно втрое. При этом разница между лучшим и худшим алгоритмом (1,5 п. п. точности) становится меньше, чем выигрыш от добавления признаков содержимого страницы (6,3 п. п. для случайного леса). Следовательно, для выявления фишинга состав признаков важнее выбора алгоритма.

Практический вывод касается архитектуры защиты. Проверка только по ссылке (например, в почтовом шлюзе) пропустит порядка каждого восьмого фишингового сайта, поэтому её целесообразно использовать как быстрый первичный фильтр, а для ссылок, не получивших однозначной оценки, выполнять загрузку страницы и полный анализ.

Заключение. Ансамблевые алгоритмы (случайный лес, градиентный бустинг) обеспечивают наилучшее качество выявления фишинговых сайтов на открытом наборе данных. Сокращение признаков до группы

адресной строки втрое увеличивает долю пропусков и нивелирует преимущество сложных алгоритмов. Ограничение работы – возраст набора данных и заранее вычисленные признаки; дальнейшая работа – проверка двухэтапной схемы на актуальной выборке с учётом времени обработки.

Список литературы

1. Мельников, В. А. Классификация технологий применения фишинга в качестве метода социальной инженерии / В. А. Мельников, А. А. Першина // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): Тезисы докладов, Москва, 23–27 октября 2023 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2023. – С. 307-308. – EDN VVHDRR.
2. Мельников В. А. Подходы к выявлению деструктивных действий и событий в информационных системах / В. А. Мельников, П. Ю. Пушкин, А. А. Мельникова [и др.] // Системы высокой доступности. – 2026. – Т. 22, № 3. – С. 112-125. – DOI 10.18127/j20729472-202603-10.
3. Павлычев, А. В. Выявление фишинговых интернет-доменов с помощью алгоритмов машинного обучения в режиме потоковой обработки данных / А. В. Павлычев, К. В. Кузьминец // Вопросы кибербезопасности. – 2025. – № 2(66). – С. 141-153. – DOI 10.21681/2311-3456-2025-2-141-153.
4. Мельников, В. А. Классификация информационно-аналитических систем безопасности в финансовых и экономических структурах по назначению / В. А. Мельников, А. А. Першина // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): Тезисы докладов, Москва, 23–27 октября 2023 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2023. – С. 315-316. – EDN VHYHKN.
5. Mohammad, R. M. Intelligent rule-based phishing websites classification / R. M. Mohammad, F. Thabtah, L. McCluskey // IET Information Security. – 2014. – Vol. 8, № 3. – P. 153-160. – DOI 10.1049/iet-ifs.2013.0202.
6. Мельников, В. А. Анализ применимости открытых инструментов работы с алгоритмами Data Mining для решения задач анализа экономических данных / В. А. Мельников, А. А. Першина, Н. А. Савченко // Актуальные проблемы нефти и газа: Сборник трудов VII Всероссийской молодежной научной конференции, Москва, 16–18 октября 2024 года. – Москва: Институт проблем нефти и газа РАН, 2024. – С. 360-361. – EDN UIKEBJ.
7. Мельников, В. А. Оценка коммерческих инструментов работы с алгоритмами Data Mining / В. А. Мельников, А. А. Першина, Н. А. Савченко // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: Тезисы докладов VIII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию профессора Ю.П. Желтова, Москва, 07–11 октября 2024 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2024. – С. 434-435. – EDN SJRFEZ.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Физическая гидроаэродинамика, метрология, техносферная безопасность

Ахметова Я.Т., Аскарова А.Я. Влияние допусков электронных компонентов на погрешность выдержки времени электронного реле времени 7

Белецкий Я.О., Беляев В.Н. Переработка отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов: экологические проблемы и мировой опыт 10

Брызгалов М.А. Петургическая технология переработки горелых пород отвалов шахт Кузбасса 13

Быковская Н.В., Асланов П.В., Собко А.Ю. Расчет снижения гидродинамического сопротивления жидкостей с добавками полимеров 14

Гайнетдинов Т.И., Закиров Р.Н. Оценка эффективности применения систем охлаждения циклового воздуха (СОЦВ) газовых турбин в летний период (на примере ГТУ-405,6(9НА.01) казанской ТЭЦ-3) 17

Гетьманенко Ф.Б., Петренко А.Г., Анучин А.С. Концепции математического моделирования синхронного гистерезисного двигателя 20

Горбунов Р.И., Романчук С.М. Интеллектуальная система анализа и прогнозирования состояния природно-технических объектов 23

Горожанкин С.А., Степакин В.Р. Анализ эффективности рекуперации энергии гибридного электромобиля 26

Дрибан В.А., Дуброва Н.А., Колесник М.В. Перколяционный подход к оценке устойчивости барьерных целиков 29

Жаркова В.В., Бускин Р.В. Типизация проектных решений от серии В-320 к проекту ВВЭР-ТОИ 32

Ипполитова С.В., Аскарова А.Я. Метрологический контроль как инструмент повышения качества прецизионных измерительных приборов 34

Ипполитова С.В., Аскарова А.Я. Применение PFMEA при метрологическом обеспечении качества механической обработки деталей 37

Колесниченко А.В., Кочетова Ж.Ю., Тронин А.Л. Непрерывный многокаскадный мониторинг авиатоплива на топливозаправочных комплексах 40

Корнилова Н.В. Образование смол и осаждений при сжигании ТКО и RDF на колосниковой решётке в печах малой мощности 43

Корнилова Н.В. Проблемы определения выхода летучих веществ для твердого биотоплива и RDF-топлива 46

Кузьмин А.В., Черкасов А.С. Брызгальные бассейны и градирни в системе технического водоснабжения АЭС: критерии выбора 49

Кузьмин А.В., Черкасов А.С. Контроль температур горячей и холодной ниток главного циркуляционного трубопровода на БЩУ 52

Кузьмин А.В., Черкасов А.С. Сравнительный анализ практик пусконаладки контрольно-измерительных приборов перед выходом атомного энергоблока на мощность 55

Кулагина Л.В., Савчиц Д.А. Безопасность литий-ионных аккумуляторов: термический аспект 58

Лебедев В.Н., Пометун Е.Д., Табачук В.А. Стенд поверки приборов для измерения вентиляции 61

Маркин В.В., Хомутянская А.В., Назарова М.А., Лебедь А.А. Изучение необходимости оценки экологической опасности сточных вод коксохимических предприятий методами биотестирования 64

Мельник О.Е., Перепеченый В.А., Перепечена С.С. Энергоэффективность структуры сельских электрических сетей Херсонской области с возобновляемыми источниками электрической энергии 66

Никишина И.А. Оценка мероприятий по снижению содержания мелкодисперсной пыли в атмосферном воздухе промышленного города 69

Плотников Д.А., Антонов Д.В. Техносферный аспект и ресурсный потенциал отхода самоспасателей при использовании в гипохлоритных системах 72

Плотников Д.М., Базин Д.А. Изотермическая ВАХ и баланс потерь ТОТЭ с GDC .. 75

Плотников Д.М., Базин Д.А. Тепловой режим ТОТЭ с GDC при различных условиях охлаждения 78

Рябовол М.И., Тюрин А.Ю., Номерчук А.Я. Сравнительный анализ LPWAN-протоколов для проектирования беспроводной сети экологического мониторинга водных объектов 81

Савченко Т.С., Кравченко М.В. Необходимость комплексной оценки профессиональных и экологических рисков в дошкольных учреждениях 84

Садовая И.В., Алехов Ю.А., Аленин В.Г. Исследование газодинамических характеристик металлокерамических фильтроэлементов 87

Сердюк А.И., Афанасьев Н.Д. Обоснование установления гигиенических нормативов ПДС загрязняющих веществ в сточные воды строительно-монтажного предприятия 90

Сердюк А.И., Беляев В.Н. Электрохимическая переработка утильных свинцово-кислотных аккумуляторов 93

Соколов К.И., Подрухин А.А., Вишняк А.И., Гангало А.Н. Лабораторная установка для определения физических свойств горных пород 96

Сытник Е.С., Пащенко Д.Ю. Оперативный контроль октановых чисел бензинов, выработанных из нефти трудноизвлекаемых запасов, методом ближней ИК-спектроскопии 99

Трубаев П.А. Влияние доли выработки электроэнергии солнечными и ветряными электростанциями на её стоимость в единых энергосистемах 102

Туровец П.К., Король Е.А. Пороговая оценка энергоэффективности вариантов жилой застройки 105

Финошин Н.В., Попова А.Е., Белоусов Н.Е., Спажук Н.В. Исследование неравномерности профилей скорости воздушного потока на выходе из конфузора аэродинамической трубы прямого действия 108

Финошин Н.В., Попова А.Е., Степанова Е.И., Половникова В.А. Исследование вихревых структур воздушного потока в пристеночной зоне труб с периодически изменяющимся поперечным сечением (ТПИПС) 111

Чипижак Д.В., Долгих В.П. Метод построения многоуровневой системы для автоматизированного мониторинга площадей водных объектов 114

Ямалов Б.Р., Базин Д.А. Удельные выбросы углерода-14 российских АЭС с разными типами реакторов по данным радиационного мониторинга 117

Теоретическая и экспериментальная физика

Агекян К.А., Буранов Р.В., Ивахненко Н.Н. Численное моделирование процессов теплопереноса в неоднородных средах с фазовыми переходами 120

Антонишин Я.Ю., Тарасенко Т.Н., Ковалев О.Е. Особенности тепловых характеристик слаболегированного марганцем феррита висмута: по данным ДСК 122

Безус А.В., Безус Ю.А., Федоров С.А. Электромагнитные волны в топологически упорядоченных слоистых средах с примесными плазменными слоями 125

Василенко Н.А. Параметры процесса магнетронного распыления и кинетика формирования тонкопленочных структур 128

Глухова Ж.Л. Системы металл-водород: исследование сопряженных явлений 131

Гордей М.М., Метлов Л.С. О границах применимости линейной модели неравновесной термодинамики при интенсивной деформации 134

Давыдовская В.В., Федорова А.В., Тарасюк Е.В., Завалей С.Н. Выявление и обоснование условий, обеспечивающих эффективную адресную локализацию световых пучков различных профилей в кубическом фоторефрактивном кристалле типа силленита 137

Евдокимов В.Е., Сементеева Л.Ш. Влияние температуры на электропроводность полупроводниковых материалов 139

Камара Д., Маркидонов А.В. Расчет парциальной плотности электронных состояний графена, допированного азотом 142

Кижаев С.С., Стоянов Н.Д., Черняев А.В. Технологические приемы улучшения качества широкополосных фотодиодов трехмикронного диапазона для экологических применений 145

Коркишко В.В., Хачатурова Т.А., Гусев А.А., Бутько В.Г. Прозрачность туннельного барьера в однозонной модели диэлектрика 147

Мирошниченко С.В., Гангало А.Н. Методика оценки коэффициентов контактного трения при равноканальном угловом прессовании 150

Мухаметрахимов И.И., Мухаметрахимова А.И. Обнаружение фазового перехода в двумерной модели Изинга методом главных компонент: влияние размера решётки 153

Посыпаев А.А., Недёркин В.В., Шемченко Е.И. Люминесцентные свойства и структурные особенности плёнок CN_x:Eu_yO_z 156

Савицкая Ю.А., Юркин А.А. Влияние технологических параметров FFF 3D-печати на дефекты и размерную точность изделий из АБС FDplast белого цвета 158

Сенникова Л.Ф., Яшарова Е.В., Гангало А.Н. Влияние предварительного охлаждения в азоте на структуру меди при осадке 161

Суровицкий В.Д., Затирка М.А., Кононенко В.В., Соколов К.И. Влияние степени деформации на механические свойства литого сплава АМц при гидроэкструзии 164

Тарасенко А.С., Тарасенко Т.Н., Сухорукова О.С. Магнитоэлектрический механизм эффекта Гуса–Хенхен в случае нормально падающего волнового пучка 167

Ткаченко В.М., Бережной Я.А., Сапронов А.Н. Влияние гидростатической и термомеханической обработки на зеренную структуру и свойства субмикрокристаллической меди 170

Токий Н.В., Носолев И.К., Резников А.В., Чернявская Н.В. Низкотемпературное внутреннее трение и дислокационная микропластичность в УМЗ меди 173

Червинский Д.А., Христов А.В., Шелест В.В. Особого вида нетривиальные связи между термодинамическими коэффициентами различной природы..... 176

Шалаев Р.В., Изотов А.И., Глазунова В.А., Яковец А.А. Контактные переходы «металл-углеродная пленка» с варисторным эффектом 179

Шитов А.А. Стационарные распределения намагниченности в слабых ферромагнетиках в электрическом поле 182

Ющенко Е.В., Фёклин В.Н., Жеребцов А.С. Физические механизмы воздействия ультразвука и слабого импульсного электромагнитного поля на структуру древесных полимеров 184

Яшарова Е.В., Сенникова Л.Ф., Суровицкий В.Д. Определение рационального режима гидроэкструзии для обработки меди..... 186

Радиофизика, инфокоммуникационные технологии, информационная безопасность

Ахметгалеев И.А., Тутубалин П.И. Обзор современных подходов и методов на основе построения радиоотпечатков для позиционирования внутри помещений 189

Бабичева М.В. Форматная строка как вектор атаки в языках высокого уровня 191

Багаутдинов А.И., Тутубалин П.И. Применение технологии Bluetooth Low Energy в системах, обеспечивающих indoor-позиционирование..... 194

Битехтин А.Д., Глазунов М.И., Кочетова Ж.Ю. Радиолокационное обнаружение БПЛА с малой эффективной площадью рассеяния в миллиметровом диапазоне длин волн 197

Варюхин В.Н., Малашенко В.В., Малашенко Т.И. Применение теории динамического взаимодействия дефектов для анализа высокоскоростной деформации металлов и сплавов 200

Гилязов А.Р., Салдаева П.А., Седов С.С. Алгоритм оценки низкоамплитудных составляющих электрокардиосигнала по одному отведению для телемедицинских систем..... 203

Данилов В.В., Третьяков И.А., Подлесный В.Ю., Колесник В.Е. Анализ эффективности методов агрегации потоков в адаптивных информационно-измерительных системах АСУ и АСНИ 206

Егорычев Е.В., Чони Ю.И. Моделирование источников ХИП-помех, воздействующих на кольцевую антенную решетку 209

Захаров В.А., Савотченко С.Е. Категорирование конфиденциальной информации на основе BERT и ИИ-агента..... 212

Иванов А.С., Потапова О.В., Чони Ю.И. Контроль ориентации оптической оси крупногабаритного параболического рефлектора, подверженного эксплуатационным искажениям 215

Исмагилов Р.Г. Рефракция радиолуча в тропосфере 218

Истратова Е.Е., Ермаков А.В. Сравнительный анализ методов защиты информации при организации передачи данных в мессенджерах..... 221

Истратова Е.Е., Лавринович А.Б., Ложкин А.С. Исследование влияния 5G на корпоративные компьютерные сети 224

Канныкин С.В., Моргачев Н.С. Веб-ориентированный комплекс спектрального анализа и интерактивной фильтрации акустических сигналов в условиях высокоинтенсивных помех 227

Колесник Е.В., Данилов В.В. Методика экспериментального исследования влияния металлических поверхностей на надёжность UHF RFID в АСНИ 229

Колесников А.Е. Оценка быстродействия поиска сообщений при использовании различных методов шифрования 232

Кузнецов А.А., Козлов С.В. Актуальность алгоритма MUSIC в современных беспроводных коммуникациях 235

Кузнецов А.А., Козлов С.В. Об актуальности алгоритма ESPIRIT в современных телекоммуникациях 238

Мельников В.А. Выборочное структурное уточнение при обнаружении массивов бинарных данных в исходных текстах программ 241

Мельников В.А. Условия принятия решения при идентификации частично наблюдаемых массивов бинарных данных 244

Мельникова А.А. Основные проблемы оценки рисков информационной безопасности организации 247

Пацева Л.Ю. Программная реализация и тестирование защищённого от атак по времени алгоритма блочного шифра «Кузнечик» 250

Подлесный В.Ю., Данилов В.В. Адаптивная обработка нестационарных измерительных сообщений в информационно-измерительных подсистемах АСУ и АСНИ 253

Рушечников Я.И. Реализация алгоритма защиты беспроводного обмена информацией, построенного на базе аналоговой рации 256

Сабирьянов А.В., Чони Ю.И. Двухканальный направленный ответвитель 258

Снимщиков М.С., Слепцов В.М., Кочетова Ж.Ю. Особенности радиолокационного обнаружения БПЛА в Ка-диапазоне на фоне помех 261

Суслин А.В., Кузин А.А. Особенности использования среды программирования Python при моделировании многофазного кода Френка 264

Суслин А.В., Кузин А.А. Особенности использования среды программирования Python при моделировании фазоманипулированного сигнала 267

Суслин А.В., Куркин Н.Р. Особенности использования среды программирования Python при моделировании М-последовательности 270

Сушко Т.И., Кожемякин А.Е., Кресс А.Н. Разработка и управление полетом мультикоптера при каскадной компоновке винтомоторных групп 274

Третьяков И.А., Долбещенкова Н.В., Писаренко Э.Д. Анализ радиопокрытия в условиях современной плотной городской застройки 277

Третьяков И.А., Кожекина Е.Н., Гончаров С.А. Архитектура автоматизированной системы идентификации радиоэлектронных средств по индивидуальным особенностям излучения 280

Чекашов Р.М., Гатин К.Р., Авксентьев А.А. Использование смартфонов на Android и iOS в качестве Wi-Fi радиостанций 283

Шелехова О.Г. Прогнозирование срока службы асинхронного двигателя при отклонении питающего напряжения 286

Шкуренков Е.С., Шишов О.А. Количественная оценка влияния мер усиления защищённости операционных систем семейства Linux на индекс автоматизированного аудита Lynis 289

Шкуренков Е.С., Шишов О.А. Модель оценки риска информационной безопасности значимого объекта критической информационной инфраструктуры на основе многокритериальной свёртки разнородных показателей 292

Шкуренков Е.С., Шишов О.А. Сравнительная оценка алгоритмов машинного обучения для выявления фишинговых веб-сайтов при разном составе признаков 295

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ДОНЕЦКИЕ ЧТЕНИЯ – 2026: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ИННОВАЦИИ, КУЛЬТУРА И ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННОСТИ

Материалы
XI Международной научной конференции,
10–12 ноября 2026 г.,
г. Донецк

ТОМ 2
Физические, технические и компьютерные науки
Часть 1

под общей редакцией проф. *С.В. Беспаловой*

Дизайн обложки	*В. Дёмина*
Технические редакторы	*В.Г. Медведева, М.В. Фоменко*
Компьютерная верстка	*В.Г. Медведева*

Адрес оргкомитета:
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
ул. Университетская, 24, г. Донецк, 283001, ДНР, РФ.
E-mail: *science.prorector@donnu.ru*

Подписано в печать 28.10.2026 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать – цифровая. Усл.-печ. л. 14,4.
Тираж 50 экз. Заказ № 26окт121/2а.
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 17,7.
Издательство ФГБОУ ВО «ДонГУ».
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 22.
E-mail: donnu.izdatelstvo@mail.ru