

МОЛОДОЙ УЧЁНЫЙ

ISSN 2072-0297

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



16+

22 2026
ЧАСТЬ II

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 22 (625) / 2026

Издается с декабря 2008 г.

Выходит еженедельно

Главный редактор: Ахметов Ильдар Геннадьевич, кандидат технических наук

Редакционная коллегия:

Жураев Хусниддин Олтинбоевич, доктор педагогических наук (Узбекистан)
Иванова Юлия Валентиновна, доктор философских наук
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук
Лактионов Константин Станиславович, доктор биологических наук
Сараева Надежда Михайловна, доктор психологических наук
Абдрасилов Турганбай Курманбаевич, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)
Авдеюк Оксана Алексеевна, кандидат технических наук
Айдаров Оразхан Турсункожаевич, кандидат географических наук (Казахстан)
Алиева Тарана Ибрагим кызы, кандидат химических наук (Азербайджан)
Ахметова Валерия Валерьевна, кандидат медицинских наук
Бердиев Эргаш Абдуллаевич, кандидат медицинских наук (Узбекистан)
Брезгин Вячеслав Сергеевич, кандидат экономических наук
Данилов Олег Евгеньевич, кандидат педагогических наук
Дёмин Александр Викторович, кандидат биологических наук
Дядюн Кристина Владимировна, кандидат юридических наук
Желнова Кристина Владимировна, кандидат экономических наук
Жуйкова Тамара Павловна, кандидат педагогических наук
Игнатова Мария Александровна, кандидат искусствоведения
Искаков Руслан Маратбекович, кандидат технических наук (Казахстан)
Калдыбай Кайнар Калдыбайулы, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)
Кенесов Асхат Алмасович, кандидат политических наук
Коварда Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук
Комогорцев Максим Геннадьевич, кандидат технических наук
Котляров Алексей Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук
Кузьмина Виолетта Михайловна, кандидат исторических наук, кандидат психологических наук
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Кучерявенко Светлана Алексеевна, кандидат экономических наук
Лескова Екатерина Викторовна, кандидат физико-математических наук
Макеева Ирина Александровна, кандидат педагогических наук
Матвиенко Евгений Владимирович, кандидат биологических наук
Матроскина Татьяна Викторовна, кандидат экономических наук
Матусевич Марина Степановна, кандидат педагогических наук
Мусаева Ума Алиевна, кандидат технических наук
Насимов Мурат Орленбаевич, кандидат политических наук (Казахстан)
Паридинова Ботагоз Жаппаровна, магистр философии (Казахстан)
Прончев Геннадий Борисович, кандидат физико-математических наук
Рахмонов Азизхон Боситхонович, доктор педагогических наук (Узбекистан)
Семахин Андрей Михайлович, кандидат технических наук
Сенцов Аркадий Эдуардович, кандидат политических наук
Сенюшкин Николай Сергеевич, кандидат технических наук
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Титова Елена Ивановна, кандидат педагогических наук
Ткаченко Ирина Георгиевна, кандидат филологических наук
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры
Фозилов Садриддин Файзуллаевич, кандидат химических наук (Узбекистан)
Яхина Асия Сергеевна, кандидат технических наук
Ячинова Светлана Николаевна, кандидат педагогических наук

Международный редакционный совет:

Айрян Заруи Геворковна, кандидат филологических наук, доцент (Армения)
Арошидзе Паата Леонидович, доктор экономических наук, ассоциированный профессор (Грузия)
Атаев Загир Вагитович, кандидат географических наук, профессор (Россия)
Ахмеденов Кажмурат Максutowич, кандидат географических наук, ассоциированный профессор (Казахстан)
Бидова Бэла Бертовна, доктор юридических наук, доцент (Россия)
Борисов Вячеслав Викторович, доктор педагогических наук, профессор (Украина)
Буриев Хасан Чутбаевич, доктор биологических наук, профессор (Узбекистан)
Велковска Гена Цветкова, доктор экономических наук, доцент (Болгария)
Гайич Тамара, доктор экономических наук (Сербия)
Данатаров Агахан, кандидат технических наук (Туркменистан)
Данилов Александр Максимович, доктор технических наук, профессор (Россия)
Демидов Алексей Александрович, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Досманбетов Динар Бакбергенович, доктор философии (PhD), проректор по развитию и экономическим вопросам (Казахстан)
Ешиев Абдыракман Молдоалиевич, доктор медицинских наук, доцент, зав. отделением (Кыргызстан)
Жолдошев Сапарбай Тезекбаевич, доктор медицинских наук, профессор (Кыргызстан)
Игисинов Нурбек Сагинбекович, доктор медицинских наук, профессор (Казахстан)
Кадыров Кутлуг-Бек Бекмурадович, доктор педагогических наук, и.о. профессора, декан (Узбекистан)
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Козырева Ольга Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия)
Колпак Евгений Петрович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Кыят Эмине Лейла, доктор экономических наук (Турция)
Лю Цзюань, доктор филологических наук, профессор (Китай)
Малес Людмила Владимировна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Нагервадзе Марина Алиевна, доктор биологических наук, профессор (Грузия)
Нурмамедли Фазиль Алигусейн оглы, кандидат геолого-минералогических наук (Азербайджан)
Прокопьев Николай Яковлевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Прокофьева Марина Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Казахстан)
Рахматуллин Рафаэль Юсупович, доктор философских наук, профессор (Россия)
Ребезов Максим Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Россия)
Сорока Юлия Георгиевна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Узаков Гулом Норбоевич, доктор технических наук, доцент (Узбекистан)
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры (Россия)
Хоналиев Назарали Хоналиевич, доктор экономических наук, старший научный сотрудник (Таджикистан)
Хоссейни Амир, доктор филологических наук (Иран)
Шарипов Аскар Калиевич, доктор экономических наук, доцент (Казахстан)
Шуклина Зинаида Николаевна, доктор экономических наук (Россия)

На обложке изображен Павел Александрович Флоренский (1882–1937), священник Русской православной церкви, богослов, религиозный философ, поэт, инженер.

Павел Флоренский родился в 1882 году в городе Евлахе, который расположен на территории современного Азербайджана. Отец его, Александр Иванович, был инженером и работал на железной дороге. Хотя сам Александр Иванович происходил из династии священнослужителей, к религии он относился весьма сдержанно. Его жена принадлежала к знатному роду крупных армянских землевладельцев и исповедовала армяно-григорианскую веру. По воспоминаниям Павла, родители старались избегать разговоров о религии.

Довольно рано мальчик увлекся математикой, а после поступления в гимназию показал блестящие результаты в учебе. Не ограничиваясь учебной программой, Павел изучал все доступные ему на тот момент материалы по физике, астрономии и геологии. Он закончил гимназию с золотой медалью и поступил на физико-математический факультет Московского университета. Там он познакомился с теми, чьи имена впоследствии оказались неразрывно связаны с культурой Серебряного века: Андреем Белым, Дмитрием Мережковским, Зинаидой Гippiус, Александром Блоком.

В годы студенчества Флоренский обратился к трудам религиозного мыслителя Владимира Соловьева. Вообще вопросами философии он интересовался еще в гимназии. Он увлекался модным в то время толстовством и даже хотел отказаться от дальнейшего обучения, но отец советовал ему продолжить образование. Перед выпуском из университета, когда Флоренскому предложили остаться на математической кафедре, молодой человек уже был настроен на поступление в Московскую духовную академию. Затем Флоренский принял священнический сан и занял должность редактора богословского журнала.

В мировоззрении Флоренского наука и религия не противоречили друг другу, а, напротив, были неразрывно связаны. Наиболее значимая теологическая работа Павла Флоренского, «Столп и утверждение Истины» (1914), примечательна благодаря особому взгляду автора на мир, его попытке найти в окружающей среде указания на истину православия.

В работе «Храмовое действо как синтез искусств» (1918) отец Павел подошел к богослужению как к проявлению «высшего синтеза разнородных художественных деятельностей» — синтезу искусств, который восходит к античной трагедии, соединяя поэзию, музыку и хореографию. Он воспринимал богослужение как целостный организм, живущий реальной жизнью в формах православного церковного искусства, имеющего национальные традиции на русской почве: многоярусный иконостас, знаменный распев и другие.

Информацию собрала ответственный редактор
Екатерина Осянина

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ

Ализаде Ф. И., Амиров С. Г.

Молекулярные механизмы образования бензола в процессе каталитического риформинга61

Ващенко Е. П., Дубровская С. И.

Получение композитных пленок с включениями частиц оксида графена и восстановленного оксида графена.....65

Дубровская С. И., Ващенко Е. П.

Формирование нанокомпозитных плёнок полиметилолакриламида с включением наночастиц Pt и Pd69

Евлоева А. М., Холохоева А. М.

Природные и синтетические красители как важнейшие объекты в органической химии72

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Бадыханов И. Р.

Анализ применения измерительной системы абсолютного давления в ракетах-носителях семейства «Ангара».....75

Бакунова В. С.

Необходимость контроля спектрального состава освещения рабочего места и его поддержание. Искусственное освещение79

Буяк В. П.

Анализ влияния шумов фотоприемного тракта на порог обнаружения слабоконтрастных объектов в оптико-электронных системах специального назначения82

Буяк В. П.

Теоретическая оценка влияния неравномерности темнового тока матричного ИК-фотоприемника на точность обнаружения малоконтрастных объектов в оптико-электронных системах специального назначения84

Гафаров А. Р.

Исследование автоматизированной системы удаленной технической диагностики поверхностей нагрева котла86

Гафаров А. Р.

Повышение эффективности диагностики поверхностей нагрева котла на основе мультипараметрического анализа потока88

Гордин Д. Д., Симаков Г. Е.

Динамика автомобиля на повороте: геометрические, физические и технические аспекты безопасности90

Энверов А. И., Гусаров М. Р., Стычев Р. И.

Противодействие сигналаподобным помехам в современных условиях: когнитивные методы и адаптация пространственно-временной обработки.....98

Ившин В. В.

Методы подавления оксидов азота в топках котлов 100

Касымов Р. Р.

Исследование современных направлений применения эффекта Ранка — Хилша 102

Lavrov I. A.

Predictive maintenance in heavy industry: how machine learning reduces downtime and cost 104

Ле Хонг Хай

Исследование разрушения горных пород и рационального расстояния между двумя сосредоточенными зарядами в масштабной бетонной модели 108

Лекомцев Д. Г.

Радиопередающие устройства ракеты-носителя «Ангара». Проблемы оценки их функционирования при подготовке ракеты-носителя «Ангара» на стартовом комплексе и в полете, пути их решения..... 115

Сергеев Н. М.

Актуальные проблемы оценки пропускной способности взлетно-посадочной полосы аэропорта 117

Сергеев Н. М.

Современные методы увеличения пропускной способности взлетно-посадочных полос аэропортов 119

Фомин А. Д.

Информационное обеспечение оперативного
управления наземным обслуживанием
бизнес-авиации: состав данных, источники
и архитектура потоков 120

Шкляев Ю. В.

Современные методы управления роем
БПЛА: обзор подходов и ограничений
существующих решений 123

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО**Градинарова А. Е.**

Применение искусственного интеллекта
в сельском хозяйстве 128

**Микитюк М. Е., Гребенюк Д. П., Стрикунов Н. И.,
Хижников А. А.**

Классификация сошников для прямого
посева 129

ХИМИЯ

Молекулярные механизмы образования бензола в процессе каталитического риформинга

Ализаде Фатима Искендер гызы, студент магистратуры;

Амиров Сабир Гараш оглы, профессор

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (г. Баку, Азербайджан)

В работе рассмотрены молекулярные механизмы образования бензола в процессе каталитического риформинга углеводородного сырья. Основное внимание уделено сравнительному анализу двух ключевых путей ароматизации: прямого дегидрирования нафтенных и многостадийной дегидроциклизации парафинов. Показано, что дегидрирование циклоалканов является термодинамически и кинетически более выгодным процессом, поскольку протекает без перестройки углеродного скелета и сопровождается образованием молекулярного водорода. В то же время дегидроциклизация парафинов представляет собой сложный процесс, включающий стадии кислотно-катализируемой активации, изомеризации, циклизации и последующего дегидрирования. Установлено, что ключевую роль в протекании данных реакций играют бифункциональные катализаторы Pt/Al_2O_3 , в которых металлические центры обеспечивают дегидрирование, а кислотные центры — структурную перестройку углеводородов. Проанализировано влияние основных технологических параметров (температуры, давления водорода, состава сырья и кислотности катализатора) на селективность образования бензола. Показано, что повышение температуры способствует ароматизации, однако одновременно усиливает побочные процессы, включая крекинг и коксообразование. Полученные результаты позволяют глубже понять конкуренцию реакционных маршрутов в риформинге и могут быть использованы для оптимизации промышленных процессов переработки нефтяных фракций с целью повышения выхода ароматических углеводородов и управления содержанием бензола в продуктах.

Ключевые слова: каталитический риформинг, бензол, ароматизация, дегидрирование, дегидроциклизация, бифункциональный катализатор.

Molecular mechanisms of benzene formation in the catalytic reforming process

This study investigates the molecular pathways of benzene formation during the catalytic reforming of hydrocarbon feedstocks. Particular attention is given to the comparative evaluation of two major aromatization routes: the direct dehydrogenation of naphthenes and the multistep dehydrocyclization of paraffins. The analysis shows that cycloalkane dehydrogenation is both thermodynamically and kinetically more favorable because it occurs without rearrangement of the carbon framework and is accompanied by the release of molecular hydrogen. By comparison, paraffin dehydrocyclization is a more complex transformation involving acid-catalyzed activation, isomerization, cyclization, and subsequent dehydrogenation reactions. The study highlights the significant role of bifunctional Pt/Al_2O_3 catalysts, where metallic active sites promote dehydrogenation while acidic sites facilitate structural modification of hydrocarbons. The effects of key operating parameters — including temperature, hydrogen pressure, feedstock composition, and catalyst acidity — on benzene selectivity are also examined. The results indicate that higher temperatures enhance aromatization reactions, although they simultaneously promote undesirable side reactions such as cracking and coke formation. The findings contribute to a better understanding of competing reaction mechanisms in catalytic reforming and may support the optimization of industrial refining processes aimed at increasing aromatic hydrocarbon production while controlling benzene concentration in final products.

Keywords: catalytic reforming, benzene, aromatization, dehydrogenation, dehydrocyclization, bifunctional catalyst.

Введение

Каталитический риформинг — один из ключевых процессов современной нефтеперерабатывающей промыш-

ленности, направленный на повышение октанового числа бензиновых фракций и образование ароматических углеводородов [3, 15]. Важным продуктом этого процесса является бензол — низкомолекулярный ароматический

углеводород, широко применяемый как сырьё для производства полимеров, каучуков, смол и лекарственных веществ [15]. Его образование представляет собой сложный многостадийный процесс, протекающий на поверхности бифункциональных катализаторов (обычно платиновых на алюмооксидной основе) и включающий реакции дегидрирования, циклизации, изомеризации и гидрокрекинга. Особую роль играют дегидроциклизация алканов и дегидрирование нафтенов, приводящие к формированию ароматического кольца.

Механизмы образования бензола существенно зависят от условий процесса — температуры, давления водорода, состава сырья и активности катализатора. Повышение температуры ускоряет ароматизацию, но может усиливать побочные реакции, такие как крекинг и коксообразование, снижая селективность. Актуальность изучения этих механизмов связана с двойственной природой бензола: с одной стороны, это ценное химическое сырьё, с другой — токсичное и канцерогенное вещество, требующее строгого контроля. Поэтому понимание путей его образования позволяет как оптимизировать выход ароматических соединений, так и снизить нежелательное содержание бензола в топливных продуктах.

Цель

Основной целью данного исследования является изучение молекулярных механизмов образования бензола в процессе каталитического риформинга и системный анализ ключевых факторов, влияющих на этот процесс. В работе проводится сравнительная оценка двух основных путей ароматизации: прямого дегидрирования нафтенов и многостадийной дегидроциклизации парафинов с анализом их термодинамических и кинетических характеристик.

Также исследование направлено на определение роли бифункциональных катализаторов Pt/Al₂O₃, в которых металлические центры обеспечивают реакции дегидрирования, а кислотные центры способствуют изомеризации и циклизации. Особое внимание уделяется синергии этих функциональных компонентов и её влиянию на селективность образования бензола.

Дополнительно оценивается влияние основных технологических параметров — температуры, давления водорода, состава сырья и кислотности катализатора — на эффективность и селективность процесса. Отдельно рассматривается двойственное влияние температуры, которая ускоряет ароматизацию, но одновременно усиливает побочные реакции, такие как крекинг и коксообразование.

Важной задачей является также учет двойственной природы бензола как ценного химического сырья и токсичного соединения, что требует разработки подходов к контролю его содержания в конечных продуктах.

Достижение указанных целей позволит углубить понимание механизмов каталитического риформинга, оптимизировать выход ароматических углеводородов

и разработать эффективные технологические решения для регулирования содержания бензола в топливных продуктах.

Экспериментальные методы

В рамках настоящего исследования применён комплексный методический подход, направленный на всесторонний анализ молекулярных механизмов образования бензола в процессе каталитического риформинга. Подход включает три взаимодополняющих блока: анализ литературных данных, термодинамическое моделирование и кинетическое рассмотрение элементарных стадий реакций, а также обобщение экспериментальных результатов, полученных в лабораторных и промышленных условиях [1, 3, 7, 9].

На первом этапе был проведён систематический анализ научной литературы, посвящённой каталитическому риформингу углеводородов на бифункциональных катализаторах Pt/Al₂O₃. Рассмотрены механизмы дегидрирования нафтенов, пути дегидроциклизации парафинов, а также роль металлических и кислотных центров катализатора в протекании данных реакций [3, 8]. Особое внимание уделено влиянию технологических параметров на селективность процессов ароматизации [2, 3, 11, 13]. Проведённый сравнительный анализ позволил выявить наиболее вероятные элементарные стадии реакций и на их основе сформировать обобщённые механизмистические схемы, которые в дальнейшем были использованы при моделировании.

Термодинамический анализ проводился для оценки принципиальной возможности протекания реакций образования бензола и определения их энергетической эффективности. Основное внимание было уделено расчёту стандартных изменений термодинамических функций: энергии Гиббса (ΔG), энтальпии (ΔH) и энтропии (ΔS).

Расчёт изменения энергии Гиббса осуществлялся по фундаментальному соотношению:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

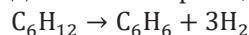
где

ΔH — изменение энтальпии реакции,

ΔS — изменение энтропии,

T — абсолютная температура (К).

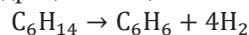
Для ключевой реакции дегидрирования циклогексана:



были использованы табличные стандартные значения энтальпий образования и энтропий веществ. Расчёты показали, что:

- $\Delta H > 0$ (реакция эндотермическая),
- $\Delta S > 0$ (увеличение числа молекул газа),
- при высоких температурах ($\approx 500^\circ\text{C}$) значение ΔG становится отрицательным, что указывает на самопроизвольность процесса.

Аналогично анализировалась суммарная реакция дегидроциклизации н-гексана:



Для данной реакции характерны более высокое значение ΔH , отражающее значительные энергозатраты процесса, а также существенное увеличение энтропии и выраженная температурная зависимость равновесного состояния системы. Дополнительно учитывалось влияние парциального давления водорода на положение равновесия в соответствии с принципом Ле Шателье: увеличение давления H_2 смещает равновесие в сторону исходных соединений, что приводит к снижению выхода бензола [3, 7].

Кинетическое рассмотрение проводилось с целью выявления лимитирующих стадий и оценки скорости протекания отдельных реакций. В рамках подхода использовались представления о гетерогенном катализе и механизме Ленгмюра — Хиншеллуда, предполагающем протекание реакции через адсорбированные на поверхности катализатора промежуточные состояния.

Скорость элементарной стадии описывалась уравнением Аррениуса:

$$k = A e^{-E_a/RT}$$

Где

k — константа скорости,

A — предэкспоненциальный множитель,

E_a — энергия активации,

R — универсальная газовая постоянная,

T — температура.

Для реакций дегидрирования характерны относительно низкие значения энергии активации на платиновых центрах, что объясняет их высокую скорость. В то же время стадии циклизации, протекающие на кислотных центрах, характеризуются более высокими энергетическими барьерами и часто являются лимитирующими.

Механизм дегидроциклизации рассматривался через последовательное образование карбокатионных интермедиатов на поверхности кислотных центров катализатора. На первом этапе происходит протонирование молекулы алкана с образованием реакционноспособного карбокатиона, что значительно снижает энергетический барьер дальнейших превращений. Далее следует перегруппировка углеродного скелета, направленная на формирование более устойчивых промежуточных структур, благоприятных для внутримолекулярного замыкания цепи [4, 11–13].

На следующей стадии реализуется внутримолекулярная циклизация, приводящая к образованию нафтенового кольца, которое затем подвергается последовательным актам дегидрирования на металлических центрах катализатора с образованием ароматического продукта. Таким образом, конечное образование ароматических соединений является результатом согласованного действия кислотной и металлической функций катализатора.

В целом кинетика процесса определяется синергией двух функциональных компонентов катализатора. Металлические центры обеспечивают реакции дегидрирования и гидрирования, стабилизируя промежуточные водородсодержащие формы, тогда как кислотные центры отвечают за изомеризацию и циклизацию углеводородного скелета. Их совместное действие определяет как скорость

образования интермедиатов, так и селективность формирования ароматических продуктов.

Для повышения практической значимости исследования моделирование проводилось при параметрах, максимально приближенных к промышленным условиям каталитического риформинга. В частности, температурный диапазон был задан в пределах 480–520 °С, давление — 1–3 МПа, а мольное отношение водорода к углеводородам варьировалось от 3 до 8. Такой выбор условий позволяет адекватно воспроизводить реальные особенности протекания реакций ароматизации в промышленном реакторе и учитывать влияние технологических факторов на кинетику и термодинамику процесса [3, 7, 9].

Температурный диапазон был выбран исходя из необходимости обеспечения достаточной скорости эндотермических реакций ароматизации, которые требуют значительного подвода энергии для преодоления энергетических барьеров. Повышение температуры способствует ускорению стадий дегидрирования и дегидроциклизации, однако одновременно может усиливать побочные реакции крекинга, что учитывалось при выборе верхней границы диапазона. Таким образом, температурные условия моделирования отражают компромисс между кинетической эффективностью и селективностью процесса.

Давление водорода рассматривалось как ключевой технологический параметр, оказывающий многоплановое влияние на систему. Оно определяет смещение равновесия реакций дегидрирования, влияет на стабильность работы катализатора и играет важную роль в подавлении процессов коксообразования. Повышенное парциальное давление водорода способствует гидрированию промежуточных активных частиц и тем самым снижает скорость дезактивации катализатора, однако одновременно может ограничивать степень ароматизации.

Мольное соотношение H_2 /углеводороды варьировалось для анализа компромисса между селективностью образования бензола и эксплуатационной устойчивостью катализатора [6]. Увеличение доли водорода способствует сохранению активности каталитической системы за счёт подавления коксообразования, но может снижать равновесную степень дегидрирования [3, 5, 14]. Таким образом, выбранный диапазон параметров позволил комплексно оценить влияние технологических условий на эффективность процесса и выявить оптимальные режимы его проведения.

Обобщение экспериментальных данных являлось заключительным этапом исследования и было направлено на сопоставление результатов теоретического моделирования с экспериментальными данными, полученными как в лабораторных, так и в промышленных установках каталитического риформинга. Такой подход позволил провести валидацию разработанных кинетических и механистических моделей в условиях, максимально приближенных к реальному технологическому процессу.

В ходе анализа рассматривался комплекс ключевых показателей эффективности процесса, включая выход ароматических углеводородов, степень превращения наф-

тенов и парафинов, скорость дезактивации катализатора, а также селективность образования бензола. Сопоставление этих параметров позволило не только оценить точность предсказаний модели, но и выявить характер отклонений, связанных с влиянием вторичных реакций и неидеальностью реальных каталитических систем.

Полученные результаты подтвердили корректность выбранных теоретических подходов и используемых механизмов реакции. Одновременно было проведено уточнение представлений о протекающих процессах, в частности о роли промежуточных интермедиатов и влиянии конкурентных реакционных путей. Это позволило более точно интерпретировать наблюдаемую кинетику и связать её с особенностями поверхности катализатора.

Итогом методического подхода стало формирование целостного представления о процессе каталитического риформинга. В рамках исследования удалось установить термодинамическую предпочтительность различных путей образования бензола, выявить лимитирующие стадии реакций, а также количественно оценить влияние технологических параметров на селективность процесса [3, 7, 10, 11, 13]. Кроме того, была установлена связь между молекулярными механизмами и промышленными условиями риформинга, что обеспечивает возможность использования полученных результатов для оптимизации реальных технологических процессов.

Заключение

В результате проведённого комплексного анализа молекулярных механизмов каталитического риформинга установлено, что образование бензола представляет собой

многофакторный процесс, реализующийся через конкуренцию двух основных реакционных маршрутов — дегидрирование нафтенных углеводородов и многостадийную дегидроциклизацию парафиновых соединений. Показано, что дегидрирование нафтенных является термодинамически и кинетически более выгодным путём, поскольку не требует существенной перестройки углеродного скелета и протекает преимущественно на металлических центрах катализатора с относительно низкой энергией активации. В отличие от этого, дегидроциклизация парафинов является многостадийным процессом, включающим кислотно-катализируемую активацию, изомеризацию, циклизацию и последующее дегидрирование, что делает её более энергоёмкой и менее кинетически эффективной.

Установлено, что эффективность образования бензола определяется совокупным влиянием температуры, парциального давления водорода, состава сырья и бифункциональной природы катализатора. Повышение температуры способствует протеканию эндотермических стадий ароматизации, но может усиливать побочные реакции, снижая селективность процесса. Давление водорода оказывает двойственное влияние, одновременно подавляя дегидрирование и стабилизируя катализатор за счёт уменьшения коксообразования, что требует поиска оптимального баланса. Нафтенное сырьё обеспечивает более высокий выход бензола по сравнению с парафиновым благодаря наличию предварительно сформированного циклического ядра. Эффективность процесса в целом определяется согласованной работой кислотных и металлических центров катализатора, обеспечивающих последовательное протекание стадий активации, циклизации и дегидрирования [8].

Литература:

1. Gates B. C. *Chemistry of Catalytic Processes* / B. C. Gates, J. R. Katzer, G. C. A. Schuit. — New York: McGraw-Hill, 1979. — 464 p.
2. Thomas J. M. *Principles and Practice of Heterogeneous Catalysis* / J. M. Thomas, W. J. Thomas. — 2nd ed. — Weinheim: Wiley-VCH, 2015. — 768 p.
3. Rahimpour M. R. Progress in catalytic naphtha reforming process: A review / M. R. Rahimpour, M. Jafari, D. Iranshahi // *Applied Energy*. — 2013. — Vol. 109. — P. 79–93. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.03.080.
4. Conversion of methanol to hydrocarbons: how zeolite cavity and pore size controls product selectivity / U. Olsbye, S. Svelle, M. Bjørgen [et al.] // *Angewandte Chemie International Edition*. — 2012. — Vol. 51, № 24. — P. 5810–5831. — DOI: 10.1002/anie.201103657.
5. Argyle M. D. Heterogeneous catalyst deactivation and regeneration: A review / M. D. Argyle, C. H. Bartholomew // *Catalysts*. — 2015. — Vol. 5, № 1. — P. 145–269. — DOI: 10.3390/catal5010145.
6. Martínez J. A thermodynamic analysis of naphtha catalytic reforming reactions to produce high-octane gasoline / J. Martínez, M. A. Zúñiga-Hinojosa, R. S. Ruiz-Martínez // *Processes*. — 2022. — Vol. 10, № 2. — Article 313. — DOI: 10.3390/pr10020313.
7. Froment G. F. *Chemical Reactor Analysis and Design* / G. F. Froment, K. B. Bischoff, J. De Wilde. — 3rd ed. — Hoboken: Wiley, 2011. — 900 p.
8. Aznárez A. Progress and recent novelties in naphtha reforming catalysts / A. Aznárez, S. A. Korili, A. Gil // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. — 2024. — Vol. 12, № 3. — Article 113066. — DOI: 10.1016/j.jece.2024.113066.
9. Bartholomew C. H. *Fundamentals of Industrial Catalytic Processes* / C. H. Bartholomew, R. J. Farrauto. — 2nd ed. — Hoboken: Wiley, 2006. — 966 p.
10. Wachs I. E. Catalysis science of supported vanadium oxide catalysts / I. E. Wachs // *Dalton Transactions*. — 2013. — Vol. 42. — P. 11762–11769. — DOI: 10.1039/C3DT50692D.

11. Catalytic conversion of light alkanes to aromatics by metal-containing HZSM-5 zeolite catalysts: A review / D. Liu, X. Li, A. Zhang [et al.] // Fuel Processing Technology. — 2021. — Vol. 216. — Article 106770. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106770.
12. Chen N. Y. Molecular Transport and Reaction in Zeolites: Design and Application of Shape Selective Catalysts / N. Y. Chen, T. F. Degnan, C. M. Smith. — New York: VCH Publishers, 1994. — 292 p.
13. Investigation on the light alkanes aromatization over Zn and Ga modified HZSM-5 catalysts in the presence of methane / Q. Li, F. Zhang, J. Jarvis [et al.] // Fuel. — 2018. — Vol. 219. — P. 331–339. — DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.104.
14. Trimm D. L. Catalysts for the control of coking during steam reforming / D. L. Trimm // Catalysis Today. — 1999. — Vol. 49, № 1–3. — P. 3–10. — DOI: 10.1016/S0920–5861(98)00401–5.
15. Akhtar M. N. Review on the catalytic conversion of naphtha to aromatics: advances and outlook / M. N. Akhtar, A. M. Aitani, A. C. Ummer, H. S. Alasiri // Energy & Fuels. — 2023. — Vol. 37, № 4. — P. 2586–2607. — DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03716.

Получение композитных пленок с включениями частиц оксида графена и восстановленного оксида графена

Ващенко Евгения Петровна, студент магистратуры;

Дубровская Серафима Ильинична, студент магистратуры

Научный руководитель: Щитовская Елена Владимировна, кандидат химических наук, доцент

Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

Научный руководитель: Колзунова Лидия Глебовна, доктор химических наук, главный научный сотрудник

Институт химии ДВО РАН (г. Владивосток)

В работе разработаны условия электрохимического синтеза и изучена структура нанокомпозитных плёнок полиакриламида (PMAA), модифицированных оксидом графена (GO), восстановленным оксидом графена (rGO). Электрохимическая полимеризация в потенциостатическом режиме ($E = -1,39$ В (н.в.э.)) обеспечивает формирование однородных композитных покрытий на металлической подложке за одну стадию. Потенциодинамические исследования показали начало осаждения полимера при $\sim 1,1$ В (н.в.э.) и максимум скорости процесса в диапазоне $1,2–1,4$ В (н.в.э.). Наличие GO и rGO увеличивает плотность тока в процессе электролиза, что свидетельствует о влиянии графеновых нанонаполнителей на кинетику полимеризации и проводящие свойства композитов. Циклические вольтамперограммы в фосфатном буфере имеют квазиёмкостный характер и демонстрируют умеренную чувствительность к введению H_2O_2 , что перспективно для создания функциональных полимерных покрытий с контролируемыми электрическими свойствами.

Ключевые слова: электрополимеризация, полиметилоакриламид, оксид графена, восстановленный оксид графена, циклическая вольтамперометрия.

Оксид графена (GO) и восстановленный оксид графена (rGO) являются востребованными углеродными нанонаполнителями для полимерных нанокомпозитов благодаря сочетанию высокой удельной поверхности, наличию кислородсодержащих функциональных групп и настраиваемой электропроводности [1, 2]. Электрохимическая полимеризация позволяет формировать композитные покрытия непосредственно на токопроводящей подложке за одну стадию [3, 4]. Цель работы — разработка условий электрохимического синтеза и исследование структуры нанокомпозитных плёнок ПМАА, модифицированных GO, rGO.

Цель данной работы — оптимизация состава электролита и режима электрохимического синтеза композитных плёнок на основе полиакриламида с включением GO и rGO.

Характеристики веществ и приготовление растворов

Полимерные пленочные покрытия на металлических электродах формировали из свежеприготовленных растворов мономерных композиций. Все рабочие растворы готовили на основе деионизированной воды с использованием реактивов высокой чистоты (х.ч. и ч. д.а.), включающих мономерные компоненты, инициатор полимеризации и необходимые вспомогательные добавки (ПАВ).

Акриламид марки PS (99 %) и N, N' –метиленабисакриламид марки Reanal применяли без дополнительной очистки.

Для проведения исследований использовали коммерческий 29–31 % раствор формальдегида («Невареактив», марка «в/с»), подвергнутый предварительной очистке методом перегонки. Количественное содержание формальдегида контролировали стандартным титриметрическим методом по ГОСТ 1625–89.

Образцы Go и rGo были синтезированы методом Хаммерса [5] в Институте химии ДВО РАН.

Полимерные покрытия формировали методом электрохимической полимеризации в потенциостатическом режиме ($E = -1,39$ В) из водного раствора следующих компонентов, указанных в таблице 1, с добавлением наночастиц Go/rGo и ПАВ для их стабилизации. После осаждения пленки подслоя цинка удаляли химическим травлением в 0,1н HCl (1–3 мин).

Таблица 1. Состав электролитов для полимеризации

Компонент	Номер электролита		
	№ 1	№ 2	№ 3
Акриламид (АА)	3 моль/л	3 моль/л	3 моль/л
N, N'-метилен-бис-акриламид (МБАА)	0,05 моль/л	0,05 моль/л	0,05 моль/л
Формальдегид (Ф)	3 моль/л	3 моль/л	3 моль/л
Хлорид цинка	0,2 моль/л	0,2 моль/л	0,2 моль/л
Оксид графена (Go)	–	0,06 г/л	
Восстановленный оксид графена (rGo)			0,06 г/л
Лаурилсульфат 3 % (ЛС)	-	0,1 г/л	0,1 г/л

Электрохимический синтез полимерных композитных материалов осуществляли на потенциостате/гальваностате Autolab PGSTAT 302N (Великобритания). В трехэлектродной электрохимической ячейке использовали: катод (стальная пластина AISI 304), анод (платиновая пластина), электрод сравнения (стандартный хлоридсеребряный электрод (ЭВЛ-1М3)).

Стальные пластины подвергали предварительной очистке: обезжиривание магниевой-оксидной пастой с последующей промывкой дистиллированной водой.

Электрохимические эксперименты осуществляли без предварительной дегазации растворов и без разделения анодной и катодной зон.

Результаты и обсуждение

Для подбора условий формирования плёнок использовали потенциодинамический режим (рисунок 1), регистрируя зависимости плотности тока от потенциала и определяя диапазон потенциалов, при котором начинается интенсивное осаждение полимерной плёнки [6].

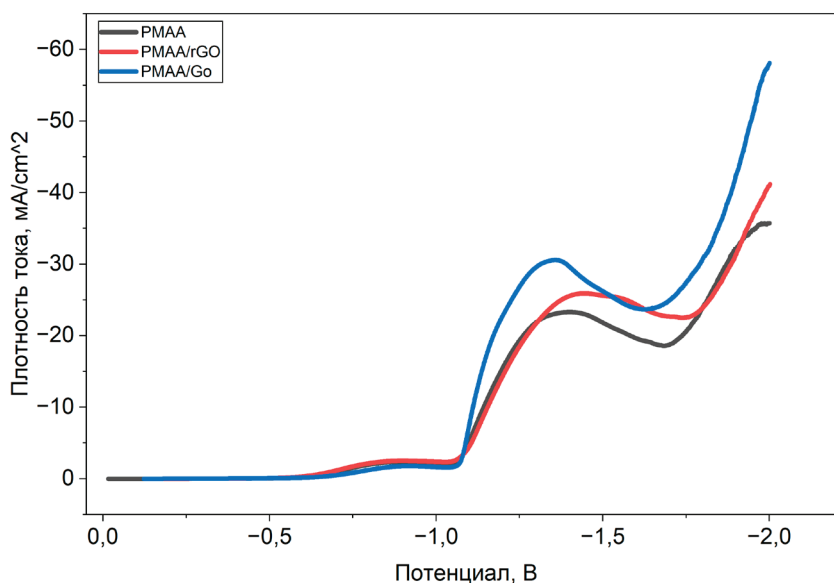


Рис. 1. Формирование полиметилоакриламидных пленок в потенциодинамическом режиме. Скорость развертки потенциала 10 мВ/с

Как видно из рисунка 1, начало формирования полимера для всех образцов начинается при потенциале 1,1 В (н.в.э.), и достигает максимальной скорости при потенциале 1,2–1,4 В (н.в.э.).

Пленки формировали на катоде из нержавеющей стали в течение 10 мин в потенциостатическом режиме электролиза при потенциале -1,39 В.

Как видно из рисунка 2, в процессе формирования композитных пленок происходит снижение плотности тока вследствие изоляции катода образующейся полимерной пленкой. Для композитных пленок РМАО с включением GO и rGO плотность тока в процессе электролиза выше, чем на РМАО на 1 и 2 мА/см², соответственно.

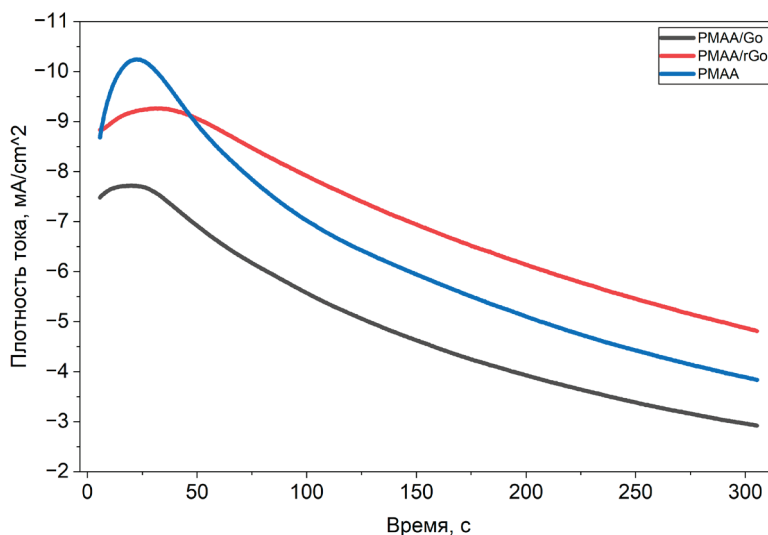


Рис. 2. Формирование полиметилакриламидных плёнок в потенциостатическом режиме, $E = -1,39$ В (н.в.э.)

Для исследования сенсорных свойств полученных нанокомпозитных плёнок была изучена их электрохимическая активность методом циклической вольтамперометрии (ЦВА) в фосфатном буферном растворе (рН 6,86) при последовательном добавлении пероксида водорода. Измерения проводили в диапазоне потенциалов от -1,0 до +0,8 В относительно хлоридсеребряного электрода сравнения. Концентрацию H_2O_2 варьировали путём последовательного добавления в ячейку объёмов 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 мл раствора пероксида водорода, соответствующее концентрации $1,28 \times 10^{-3}$; $2,56 \times 10^{-3}$; $3,84 \times 10^{-3}$ и $5,12 \times 10^{-3}$.

Для композитных электродов, сформированных в электролите № 4 и № 6 (концентрация GO и rGO 0,06 г/л) происходит значительный рост катодного отклика. Это свидетельствует о формировании развитой проводящей сети в полимере и увеличении электрохимически-активной поверхности [7, 8].

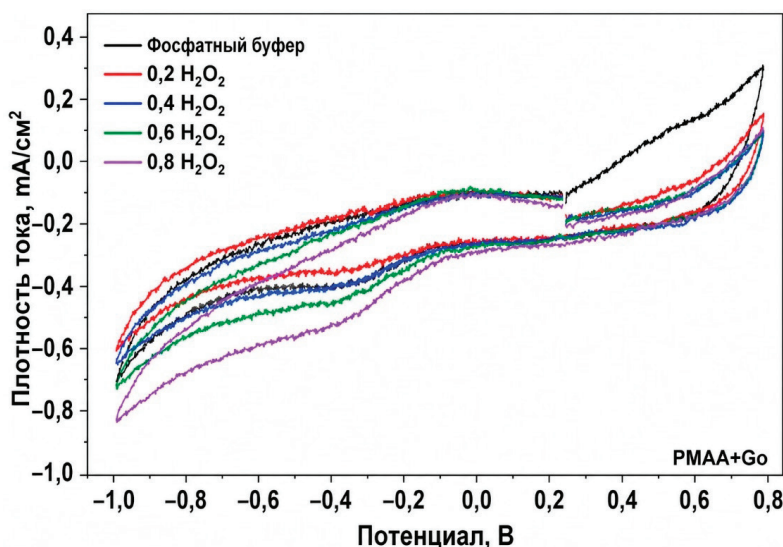


Рис. 3. Циклические вольтамперограммы композитов РМАО+GO (0,06) при последовательном введении $1,28 \times 10^{-3}$ М H_2O_2 .

Скорость развертки потенциала 100 мВ/с

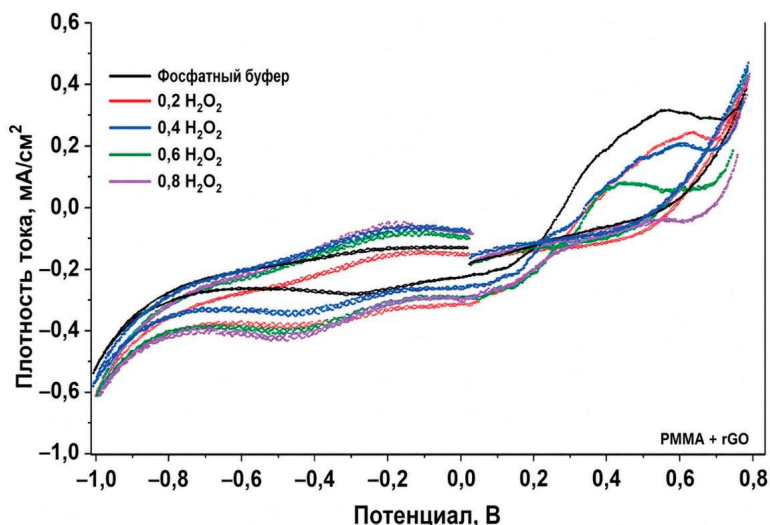


Рис. 4. Циклические вольтамперограммы композитов PMAA+rGo (0,06) при последовательном введении $1,28 \times 10^{-3}$ М H_2O_2 . Скорость развертки потенциала 100 мВ/с

При добавлении 0,8 мл H_2O_2 ($5,12 \cdot 10^{-3}$ М) в раствор, модифицированный частицами GO и rGO (рисунок 5) катодный ток достигает $-0,94 \text{ mA/cm}^2$ и $-0,78 \text{ mA/cm}^2$ соответственно.

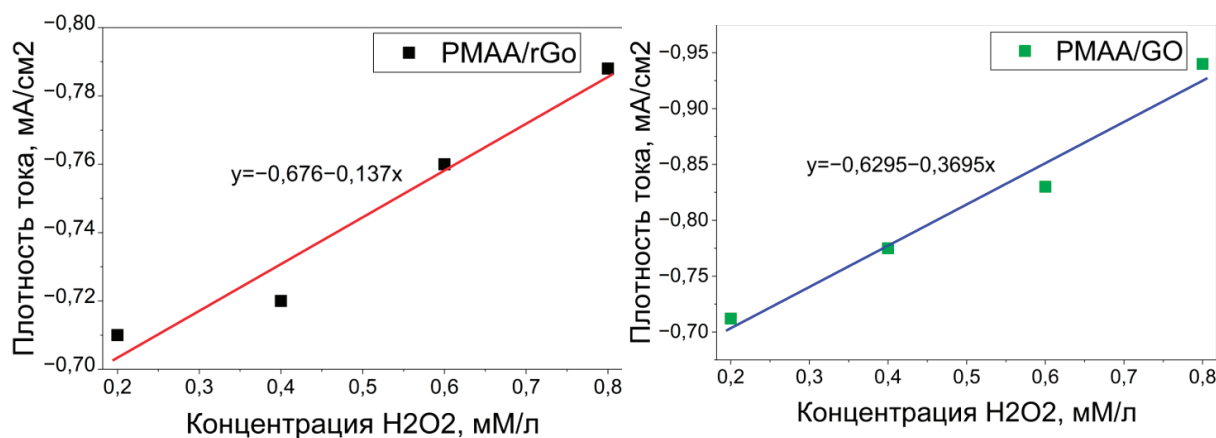


Рис. 5. Зависимости амперометрического отклика от концентрации H_2O_2

Как видно из рисунка 5, данные системы чувствительны к пероксиду водорода и могут быть использованы в качестве амперометрических сенсоров.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИХ ДВО РАН, тема 3 FWFN 0205–2022–0001.

Выводы

1. Разработаны оптимальные условия электрохимического синтеза нанокомпозитных плёнок ПМАА с GO, rGO в потенциостатическом режиме при $E = -1,39 \text{ В}$. Показано, что начало осаждения полимера приходится на $\sim 1,1 \text{ В}$ (н.в.э.), а максимальная скорость процесса — в диапазоне $1,2\text{--}1,4 \text{ В}$ (н.в.э.).
2. Установлено, что добавление GO и rGO повышает плотность тока полимеризации, что указывает на их влияние на кинетику процесса и проводящие свойства композитов.
3. Циклическая вольтамперометрия выявила квазиёмкостное поведение плёнок и амперометрический отклик на добавление пероксида водорода, что подтверждает перспективность материалов для функциональных композитных материалов и амперометрических сенсоров.

Литература:

1. Shahryari Z., Yeganeh M., Gheisari K., Ramezanzadeh B. A brief review of the graphene oxide-based polymer nanocomposite coatings. *J. Coat. Technol. Res.*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 945–969.
2. Tjong S. C. Synthesis and structural–mechanical property characteristics of graphene–polymer nanocomposites. *Advances in Polymer Nanocomposites*, Elsevier, 2012, pp. 335–375.
3. Колзунова Л. Г. Физико-химические закономерности формирования и структура полимерных пленок при электрохимическом иницировании полимеризации: специальность 02.00.04 «Физическая химия»: диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук / Л. Г. Колзунова — Владивосток, 2000. — 456 с.
4. Domínguez C., Sánchez-Muñoz S., Otero T. F. et al. Electrochemical considerations for the electropolymerization of PPy films. *ChemElectroChem.*, 2023, vol. 10, no. 15, e202300188.
5. Аяганов, Ж. Е. Метод Хаммерса как способ получения мелкодисперсного графита для практического применения / Ж. Е. Аяганов, М. Т. Габдуллин, Х. А. Абдуллин [и др.]. — DOI // Физика и технология наноматериалов и структур: Сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Курск, 23–25 мая 2017 года. Том 1. — Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2017. — С. 194–198.
6. Collins, G. L. Mechanism of coating by electropolymerization on metal cathodes from zinc chloride Solutions of Acrylamide / G. L. Collins, T. W. Norman // *J. Polymer Science: Polymer chemistry edition* — 1977. — Vol. 15. — P. 1819–1831.
7. Tjong, S. C. Synthesis and structural–mechanical property characteristics of graphene–polymer nanocomposites / S. C. Tjong // *Advances in Polymer Nanocomposites* / ed. by F. Gao. — Amsterdam: Elsevier, 2012. — P. 335–375.
8. Alam, S. N. Synthesis of graphene oxide (GO) by modified Hummer’s method and its thermal reduction to obtain reduced graphene oxide (rGo) / S. N. Alam, N. Sharma, L. Kumar. — DOI 10.4236/graphene.2017.61001 // *Graphene*. — 2017. — Vol. 6, No. 1. — P. 1–18.

Формирование нанокомпозитных плёнок полиметилолакриламида с включением наночастиц Pt и Pd

Дубровская Серафима Ильинична, студент магистратуры;

Вашенко Евгения Петровна, студент магистратуры

Научный руководитель: Щитовская Елена Владимировна, кандидат химических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

Научный руководитель: Колзунова Лидия Глебовна, доктор химических наук, главный научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН (г. Владивосток)

В работе разработаны условия одностадийного электрохимического формирования и исследованы свойства нанокомпозитных плёнок на основе полиметилолакриламида (ПМАА) с включением наночастиц палладия (PdNPs), платины (PtNPs) и их биметаллической системы Pt–PdNPs. Электрополимеризация в потенциостатическом режиме при $E = -1,17$ В обеспечивает формирование сплошных равномерных покрытий на стальной подложке за 10 мин. Показано, что наличие Pt-содержащих частиц увеличивает плотность тока полимеризации на ~50 мА по сравнению с чистым ПМАА и композитом ПМАА/PdNPs, что свидетельствует о каталитическом влиянии платины на кинетику процесса. Циклическая вольтамперометрия в фосфатном буфере выявила типичные пики десорбции водорода и адсорбции/десорбции кислорода; совместное присутствие Pt и Pd усиливает токи этих процессов, что подтверждает перспективность полученных металл-полимерных композитов для применения в электрокатализе и сенсорных устройствах.

Ключевые слова: электрополимеризация, полиметилолакриламид, наночастицы платины, наночастицы палладия, биметаллические композиты, циклическая вольтамперометрия.

Особый интерес в материаловедении представляют композитные материалы, в которых частицы металлов распределены в объёме полимерной матрицы. Такая организация позволяет использовать полимер как эффективный стабилизатор, предотвращающий агрегацию наночастиц, и одновременно как среду, обеспечивающую высокую скорость переноса заряда [1]. Благодаря этому композиты находят широкое применение в качестве катализаторов, электрохимических сенсоров и компонентов топливных элементов [2–4].

Наиболее перспективным методом получения таких материалов является электрохимический синтез (электрополимеризация). Его преимущества — одностадийность процесса, возможность нанесения плёнки непосредственно на токопроводящую подложку и точный контроль толщины покрытия [5]. Именно комплекс таких свойств делает нанокompозиты класса металл-полимер перспективными материалами — электрохимической энергетики до катализа органических реакций [5].

Цель данной работы — разработка условий одностадийного электрохимического формирования и исследование свойств композитов на основе полиметилоакриламида (ПМАА) с включением наночастиц палладия (PdNPs), платины (PtNPs) и их биметаллической комбинации (Pt-PdNPs).

Материалы и методы

Растворы композиций для получения нанокompозитных пленок на поверхности металлических электродов готовили непосредственно перед началом эксперимента. В качестве растворителя использовали деионизированную воду. Все применяемые реактивы: мономеры, различные соли, вспомогательные добавки и другие вещества имели высокий класс чистоты, на уровне ч. и х. ч.

Акриламид марки PS (99 %) и N, N'-метилден-бис-акриламид марки Reanal применяли без дополнительной очистки.

Формальдегид использовали в виде 29–31 % раствора марки в/с производства «Невареактив», предварительно перегнанного. Массовую долю формальдегида определяли по ГОСТ 1625–89 (титрованием гидроксида натрия, образовавшегося в результате реакции формальдегида с нейтральным раствором сернокислого натрия).

Формирование полимерных пленок проводили в режиме потенциостатического электролиза ($E = -1,17$ В) из водного раствора компонентов, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Состав электролитов для полимеризации

Компонент, моль/л	Электролит			
	1	2	3	4
Акриламид (АА)	3	3	3	3
N,N'-метилден-бис-акриламид (МБАА)	0,05	0,05	0,05	0,05
Формальдегид (Ф)	3	3	3	3
Хлорид цинка	0,2	0,2	0,2	0,2
Гексахлороплатинат (IV) водорода, H_2PtCl_6	–	–	10^{-3}	10^{-3}
Хлорид палладия, $PdCl_2$	–	10^{-3}	–	10^{-3}
Обозначение композитов	ПМАА	ПМАА/PdNPs	ПМАА/PtNPs	ПМАА/Pt-PdNPs

Синтез и изучение электрохимического поведения композитов проводили с использованием потенциостата/гальваностата Autolab PGSTAT 302N (Великобритания) и IPC-Pro 8,0 фирмы Stonas (Россия). Ячейку подключали к потенциостату по трехэлектродной схеме. Рабочим электродом (катод) служила пластина из нержавеющей стали марки AISI304, вспомогательным (анод) — платиновая пластина. В качестве электрода сравнения использовали насыщенный хлорид-серебряный электрод ЭВЛ-1МЗ. Разделение анодного и катодного пространства специальными перегородками не применяли. Электролиз проводили без дегазации растворов.

Перед проведением электрохимического формирования композитов поверхность металлических электродов из нержавеющей стали марки AISI304 обезжиривали пастой из мелкодисперсного оксида магния, тщательно промывали деионизированной водой.

Результаты и обсуждение

Как видно из рисунка 1 (а), формирование всех композитных пленок происходит при потенциале $-1,16$ — $-1,17$ В, что соответствует максимальной плотности тока формирования композита и является максимальной скоростью процесса.

Синтез чистых ПМАА пленок, а также нанокompозитных ПМАА/PtNPs, ПМАА-PdNPs и ПМАА/Pt-PdNPs проводили на катоде в режиме потенциостатического электролиза. Эксперименты показали, что нанокompозитные пленочные покрытия формируются на стальном электроде в виде сплошной равномерной по толщине пленки в течение 3–10 минут. Нами было выбрано время формирования композитов 10 минут.

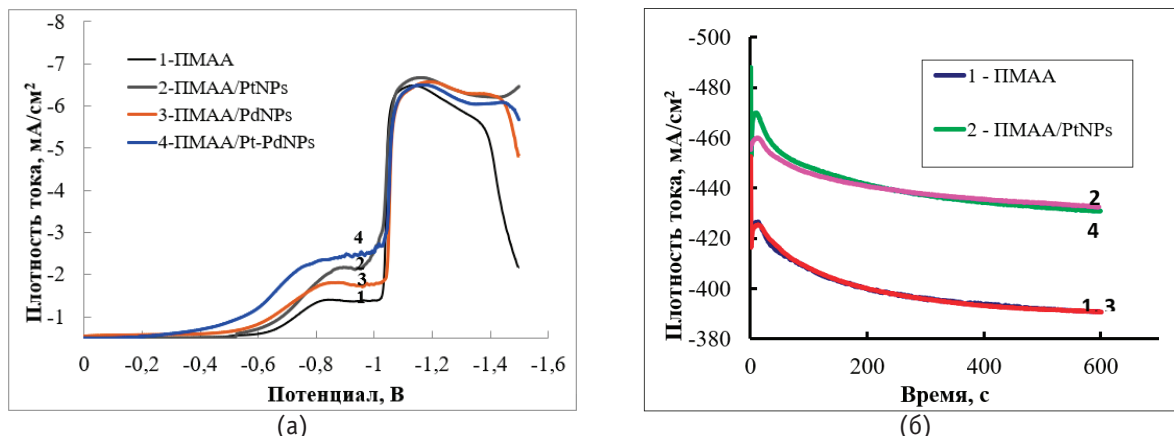


Рис. 1. Формирование композитов ПМАА:

(а) — в потенциодинамическом режиме. Скорость развертки потенциала 10 мВ/с.

(б) — в потенциостатическом режиме. $E = -1,17$ В

Как видно из рисунка 1 (б), плотность тока в процессе формирования композитов примерно на 50 мА выше для композитов, содержащих Pt (ПМАА/PtNPs и ПМАА/Pt-PdNPs), тогда как значения зависимости плотности тока в процессе формирования чистых пленок ПМАА и композита с включением Pd (ПМАА/PdNPs) практически совпадают.

Изучение электрохимических свойств композитов проводили путем снятия вольтамперных зависимостей в фосфатном буферном растворе (рН 6,86) при скорости развертки потенциала 100 мВ/с (рисунок 2).

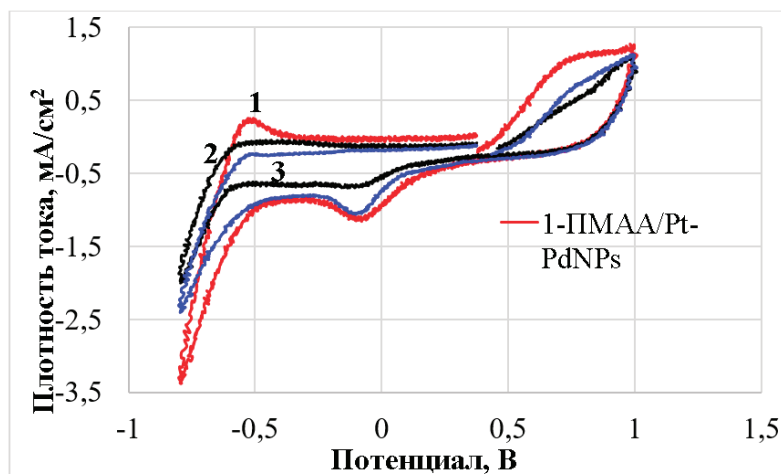


Рис. 2. ЦВА-зависимости для композитных электродов в фосфатном буферном растворе (рН 6,86). Скорость развертки потенциала 100 мВ/с

Из рисунка 2 видно, что форма всех ЦВА идентична. Пик на анодной ветви при $E = -0,51$ В соответствует процессу десорбции водорода. Пик на анодной ветви ЦВА при $E = 0,75$ В и на катодной ветви при $E = -0,2$ В, соответствуют процессам адсорбции и десорбции кислорода соответственно.

При совместном присутствии наночастиц Pt и Pd происходит возрастание плотности тока пиков как на анодной, так и на катодной ветвях ЦВА, что подтверждает перспективность изучения и применения в электрокатализе, сенсорных устройствах и топливных элементах.

Выводы

1. Установлен оптимальный потенциал для синтеза, который составил $-1,17$ В, что обеспечивает максимальную скорость формирования композитов.
2. Присутствие платины в электролите существенно ускоряет процесс электрополимеризации. Плотность тока для композитов ПМАА/PtNPs и ПМАА/Pt-PdNPs примерно на 50 мА выше по сравнению с чистым ПМАА и ПМАА/PdNPs, что свидетельствует о каталитическом влиянии платины на кинетику формирования полимерной матрицы.

3. Методом циклической вольтамперометрии установлено, что при совместном присутствии наночастиц Pt и Pd происходит возрастание плотности тока пиков как на анодной, так и на катодной ветвях ЦВА, что подтверждает перспективность изучения и применения в электрокатализе и сенсорных устройствах.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИХ ДВО РАН, тема 3 FWFN 0205–2022–0001.

Литература:

1. Electrochemical methods for synthesis and in situ generation of organometallic compounds / Z. N. Gafurov, A. O. Kantyukov, A. A. Kagilev, O. G. Sinyashin. — Текст: непосредственный // Coord. Chem. Rev. — 2021. — № 442. — С. 213986.
1. Kolzunova, L. Polymethylolacrylamide / AuNPs Nanocomposites: Electrochemical Synthesis and Functional Characteristics / L. Kolzunova, E. Shchitovskaya, M. Karpenko. — Текст: непосредственный // Polymers. — 2021. — № 13. — С. 2382.
1. Samorodnova, A. P. Electrochemical approaches to the synthesis of silicon-containing polymers / A. P. Samorodnova, M. N. Khrizanforov, A. A. Zagidullin. — Текст: непосредственный // Polymer. — 2025. — С. 127925.
1. Khaleque, M. A. Chemical and electrochemical synthesis of doped conducting polymers and their application in supercapacitors: An overview / M. A. Khaleque, Aly M A Saad, Z. H. Khan. — Текст: непосредственный // Chem. Eng. J. — 2025. — С. 160444.
1. Грибкова, О. Л. Электрохимическая полимеризация пиррола в присутствии сульфокислотных полиэлектролитов / О. Л. Грибкова, В. А. Кабанова, А. А. Некрасов. — Текст: непосредственный // Электрохимия. — 2019. — № 11. — С. 681–687.

Природные и синтетические красители как важнейшие объекты в органической химии

Евлоева Амина Мусаевна, студент;
Холохоева Ася Мусаевна, студент
Ингушский государственный университет (г. Магас)

В работе рассматриваются природные и синтетические красители как важнейшие объекты органической химии. С помощью фотоэлектроколориметрии измерили оптическую плотность растворов, предварительно доведённых визуально до одинаковой интенсивности окраски. Статья отмечает значимость красителей в различных отраслях, а также важность выбора между природными и синтетическими образцами красителей.

Ключевые слова: природные и синтетические красители, фотоэлектроколориметрия, оптическая плотность, поглощение света, сравнительный анализ.

Введение

Мы сталкиваемся с красителями ежедневно. Одежда, еда, лекарства, бытовая химия — цвет есть практически у всего. Самыми древними считаются природные красители. Люди научились добывать их из растений, древесной коры, а иногда и из насекомых. Но всё изменилось во второй половине XIX века, когда активно начала развиваться органическая химия. Появились синтетические красители, и они достаточно быстро вытеснили природные. Почему? Они оказались ярче, устойчивее к выцветанию и стирке, да и стоили заметно дешевле. [2, с. 206]

Однако не всё так однозначно. У синтетики есть серьёзные минусы: некоторые из них вызывают аллергию, а отдельные соединения и вовсе токсичны. Природные красители в этом смысле выглядят безопаснее, хотя и уступают по стойкости. Так что же лучше? Вопрос непростой. Один из способов приблизиться к ответу — сравнить их объективные оптические параметры.

В этой работе мы решили оценить способность красителей поглощать свет. Для количественных измерений выбрали фотоэлектроколориметрию. Этот метод как раз и позволяет определять оптическую плотность раствора. Чем она выше, тем интенсивнее окраска при одинаковой концентрации.

Цель работы: Провести количественный анализ на сравнение природного и синтетического красителей методом фотоэлектроколориметра.

Теоретическая часть

У природных и синтетических красителей есть общая черта. В основе их молекул лежат сопряжённые системы π -связей. Именно они ответственны за то, что вещество поглощает свет в видимой области. Простое правило: чем длиннее такая система, тем больше длина волны поглощаемого света и тем насыщеннее цвет.

Природные красители обычно представляют собой смеси близких по строению соединений. Свекольный сок, например, окрашивают бетацианины их существует несколько видов. Метиленовый синий, напротив, вещество индивидуальное. Его структура точно известна, как и молекулярная масса. [4, с. 123]

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были взяты растительные индикаторы — свекольный сок и метиленовый синий. Прежде чем приступить к исследованию была проведена предварительная проверка прибора. Анализ проводился на фотоэлектроколориметре. С помощью данного прибора измеряется концентрация окрашенных веществ в растворе.

Природный краситель готовили сами. Свежую свёклу натерли на мелкой тёрке, заливаем дистиллированной водой 1:2 по объёму и нагреваем до 100–120°C в течение 20 минут. Полученный экстракт охлаждаем и фильтруем через бумажный фильтр.

Синтетический краситель — метиленовый синий, приготовили иначе. Навеску метиленового синего 0,100 г медленно перемешивая растворяем в 1 литре дистиллированной воды. Таким образом получаем исходный раствор с точно известной концентрацией равное 0,01 %. Перед измерением еще раз дополнительно разбавляем в 2–3 раза, чтобы ослабить слишком насыщенный цвет.

Далее, нужно оба красителя разбавить дистиллированной водой до одинаковой визуальной интенсивности окраски, контроль проводят на глаз, используя одинаковые кюветы, чтобы конечные растворы имели светло-розовый свёкла и светло-голубой метиленовый синий оттенки.

Сначала проверили прибор и установили нулевое значение по дистиллированной воде. Затем в кювету наливали по 5 мл исследуемого раствора. И следовательно в течении длительного времени поочередно измеряем оба красителя при одном и том же положении прибора.

Результаты измерений

Раствор	Показания прибора
Дистиллированная вода	0,00
Свекольный сок	0,4
Метиленовый синий	0,7

Метиленовый синий дает на приборе больше значения, чем свекольный сок. Это доказывает, что синтетический краситель характеризуется более высокой способностью к поглощению света чем природный, даже если на глаз растворы выглядят одинаково яркими.

Обсуждение результатов

Если посмотреть на таблицу, видно: метиленовый синий даёт на приборе 0,7, тогда как свекольный сок только 0,4. Разница заметная. И что важно — она сохраняется даже тогда, когда на глаз оба раствора выглядят одинаково яркими. То есть синтетический краситель поглощает свет интенсивнее природного, хотя визуально окраска кажется такой же.

Чем это объяснить? Скорее всего, дело в химическом строении. Метиленовый синий это индивидуальное соединение. У него жёсткая, хорошо организованная сопряжённая система π -связей. Свекольный экстракт другое дело. Это сложная смесь. В ней есть несколько бетацианинов, а также другие пигменты, плюс белки, пектины и прочие вещества, которые не дают окраски, но разбавляют раствор. Пигменты в такой смеси могут частично гасить друг друга или просто иметь разную молярную экстинкцию. В итоге при одинаковой визуальной интенсивности реальная способность поглощать свет оказывается ниже.

Вывод

В ходе работы мы сравнили светопоглощение двух красителей природного и синтетического методом фотоэлектроколориметрии. Эксперимент показал: синтетический образец поглощает свет заметно интенсивнее, даже если растворы

выглядят одинаково яркими на глаз. Это подтверждается цифрами (0,7 против 0,4). Причина, по-видимому, кроется в различиях химического строения. Природный краситель- многокомпонентная смесь, а синтетический -индивидуальное вещество с более упорядоченной системой сопряжённых связей.

Литература:

1. Алов Н. В. и др. Обзоры методов синтеза и анализа органических пигментов.
2. Барановский В. Ф., Горелкин С. М., Городенцева В. А. Физико-химические методы анализа: М.: Высшая школа, 1972. ISBN.с.123
3. Коган И. М. Химия красителей. — М.: Химия. (Обширный справочник и учебное пособие с подробным описанием производств красителей различных классов). с.96–101
4. Ляликов Ю. С. Физико-химические методы анализа, М.: Химия, 1964.с.95
5. Степанов Б. И. Введение в химию и технологию органических красителей. — М.: Химия. с.206

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Анализ применения измерительной системы абсолютного давления в ракетах-носителях семейства «Ангара»

Бадыкшанов Игорь Ришатович, инженер
Космодром «Плесецк» (Архангельская область)

В данной статье автор рассказывает об измерительной системе абсолютного давления, применяемой в ракетах-носителях семейства «Ангара», и о возможном улучшении ее метрологических характеристик.

Ключевые слова: измерительная система абсолютного давления, «Ангара», функциональный датчик, тензорезистор, импульсная обработка.

Введение

Для организации гибкого управления пневмогидравлическими системами (ПГС) двигательных установок (ДУ) универсальных разгонных модулей (УРМ) ракет-носителей (РН) семейства «Ангара» требуются точные средства измерения давления в баках окислителя «О», горючего «Г», шаробаллонах управления (1), наддува баков (2) (показано на рисунке 1) и передачи полученной информации в бортовую систему управления, которая взаимодействует с агрегатами ПГС двигательных установок.

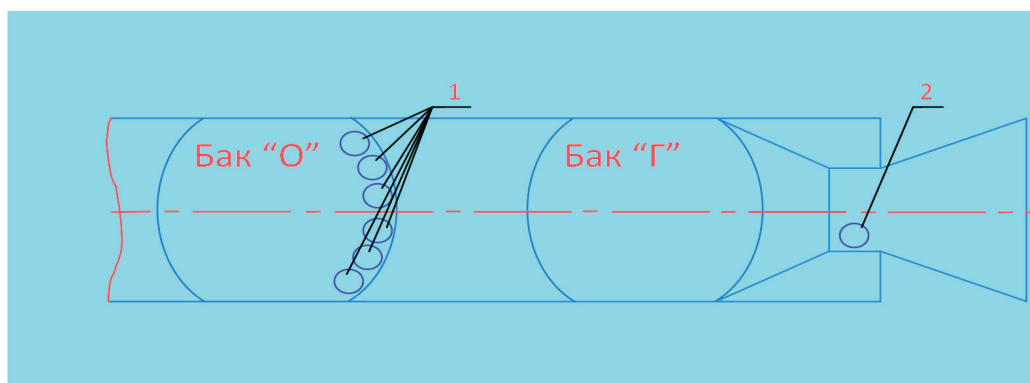


Рис. 1. Элементы РН, требующие точного измерения давления для гибкого управления ПГС ДУ

Для этого Научно-исследовательский институт физических измерений и институт проблем управления Российской академии наук разработал измерительную систему абсолютного давления (ИСАД).

Измерительная система абсолютного давления (ИСАД) предназначена для измерения абсолютного давления в баках и баллонах ПГС РН и выдачи информации об измеренных давлениях. [1]

В общем случае измерительная система абсолютного давления показана на рисунке 2 и состоит из:

- датчиков абсолютного давления (ДАВ 088) поз. 3;
- многоканального цифрового преобразователя (МЦП1) поз. 4;
- межприборного кабеля поз. 5, соединяющего датчики абсолютного давления с МЦП1. [1]

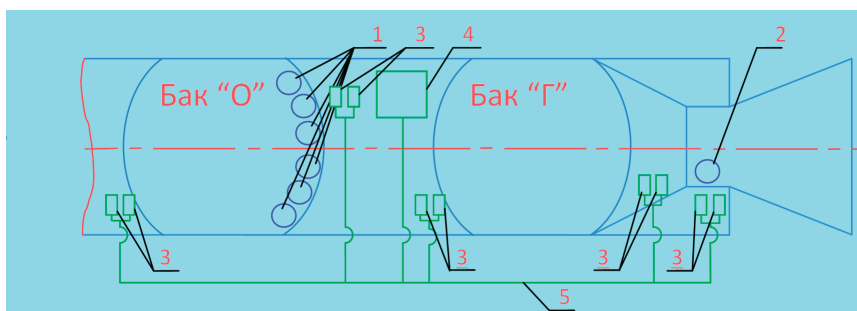


Рис. 2. Схема размещения бортовой аппаратуры ИСАД

Каждый датчик абсолютного давления имеет два тонкопленочных чувствительных элемента (ЧЭ), что позволяет организовать два независимых, гальванически развязанных измерительных канала (ИК).

ЧЭ изготавливается с применением микроэлектронной технологии, которая представляет собой плоскую неразрезную балку с жестким центром. Сам ЧЭ изготовлен из инварного сплава 36НХТЮ. Воспринимающая поверхность балки полируется до зеркального блеска для получения оптимальных условий формирования на этой поверхности измерительной тензосхемы. [2]

Для проведения измерений в каждой точке используются 2 датчика абсолютного давления, образующих 1 функциональный датчик (ФД). Функциональный датчик имеет 4 независимых, гальванически развязанных выхода. Показано на рисунке 3.

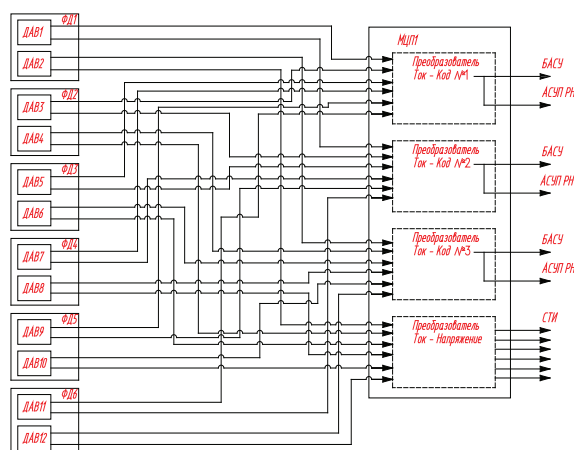
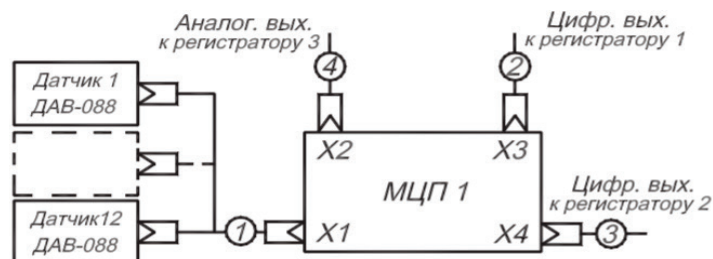


Рис. 3. Функциональная схема ИСАД

Как показано на рисунке 4, информация с первых 3-х выходов каждого ФД поступает после обработки МЦП1 (последовательным цифровым кодом в формате RS 485) в БАСУ и АСУП РН. Информация с 4-го выхода каждого ФД поступает после обработки МЦП1 (в виде аналогового сигнала (напряжение) в СТИ.



Кабель 1 от ДАВ 088 до МЦП 1 не более 50 м.
Кабель 2 от МЦП 1 до регистратора 1 не более 9 м.
Кабель 3 от МЦП 1 до регистратора 2 не более 300 м.
Кабель 4 от МЦП 1 до аналогового регистратора не более 9 м.

Рис. 4. Схема обмена информацией МЦП 1 со смежными системами

ИСАД позволяет измерять абсолютное давление в 6 различных точках. Диапазон измеряемых давлений:

0–1,6 кгс/м²; 0–3 кгс/м²; 0–4 кгс/м²; 0–6 кгс/м²;

0–10 кгс/м²; 0–25 кгс/м²; 0–60 кгс/м²; 0–100 кгс/м²;

0–160 кгс/м²; 0–250 кгс/м². [1]

Основная погрешность ИСАД с доверительной вероятностью 0,95 — не более 0,5 % от диапазона измерения. [1]

Для установки на изделие датчики давления выпускаются в двух конструктивных исполнениях — штуцерное разъемное соединение (резьбовое) и штуцерное неразъемное соединение (сварка). [1]

Количество точек измерения и величины измеряемых давлений определяется разработчиком УРМ, согласно таблицы 1, выбором количества используемых датчиков и их диапазоном измерения при заказе ИСАД. [1]

Таблица 1. Диапазоны измерений и способ соединения датчиков абсолютного давления ДАВ-088

Индекс	Диапазон измерений, кгс/см ²	Способ соединения	Индекс	Диапазон измерений, кгс/см ²	Способ соединения
ДАВ 088	0 – 1,6	Штуцерное неразъемное соединение	ДАВ 088 – 10	0 – 1,6	Штуцерное разъемное соединение
ДАВ 088 – 01	0 – 3		ДАВ 088 – 11	0 – 3	
ДАВ 088 – 02	0 – 4		ДАВ 088 – 12	0 – 4	
ДАВ 088 – 03	0 – 6		ДАВ 088 – 13	0 – 6	
ДАВ 088 – 04	0 – 10		ДАВ 088 – 14	0 – 10	
ДАВ 088 – 05	0 – 25		ДАВ 088 – 15	0 – 25	
ДАВ 088 – 06	0 – 60		ДАВ 088 – 16	0 – 60	
ДАВ 088 – 07	0 – 100		ДАВ 088 – 17	0 – 100	
ДАВ 088 – 08	0 – 160		ДАВ 088 – 18	0 – 160	
ДАВ 088 – 09	0 – 250		ДАВ 088 – 19	0 – 250	

«Алгоритм управления ПГС» состоит из блоков, осуществляющих:

1. Обработку информации, поступающей от ИСАД, фильтрации ошибок измерения и формирование оценок величин давлений и их производных в газовых полостях баков и в баллонах.

2. Управление ЭПК, обеспечивающими расходование газа наддува и управления ДПК для поддержания давлений в баках в заданном диапазоне.

В алгоритме применено два уровня фильтрации случайных ошибок измерения. На первом уровне за счет использования более частого (через 45мс), чем алгоритмический такт (~500мс), опроса каналов ФД и затем осреднения показаний, полученных в течение алгоритмического такта, могут быть отфильтрованы (или значительно уменьшены) составляющие помех с частотами выше частоты основного такта. На втором уровне для измеряемых величин давлений в газовых полостях топливных баков используется технология фильтрации, основанная на сопоставлении сигналов по величине их отклонения от прогнозируемого значения. Сигналы, величины отклонений которых укладываются в заранее назначенные пределы, осредняются, а затем с выбранными весовыми коэффициентами суммируются с результатами прогнозирования. Полученный результат является текущей оценкой измеряемого давления, рисунок 5.

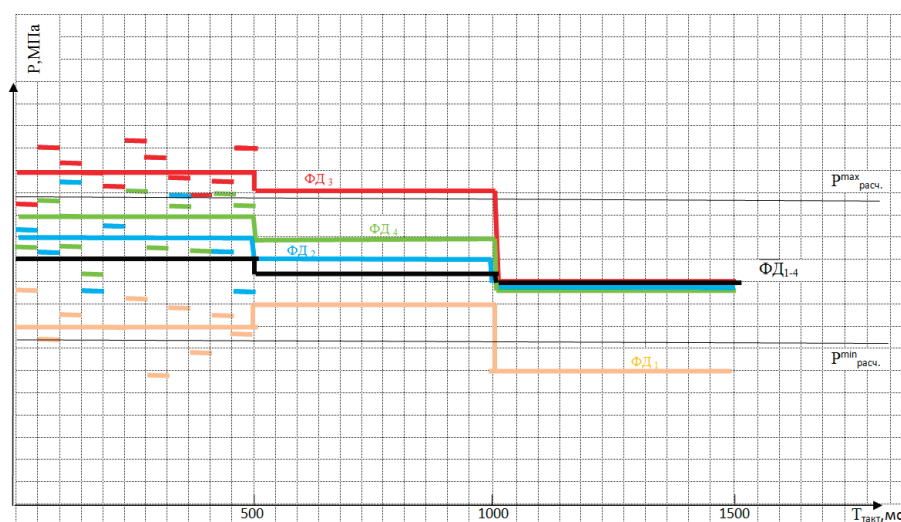


Рис. 5. Текущая оценка измеряемого давления

Диагностика работы ФД построена по двухуровневой схеме. На первом входном уровне, диагностируется отказ отдельных каналов ФД, если осредненный на алгоритмическом такте сигнал с них превышает физически допустимые пределы, которые рассчитываются из предельных условий работоспособности изделия, максимальных расходов газа наддува и т. п. Следующий уровень — диагностика по величине отклонения от прогнозируемого значения. В результате на время или полностью из управления исключаются отказавшие каналы измерения. Процедуры оценивания давления и диагностирования сигналов с отдельных каналов ФД строятся по мажоритарной схеме (два из трех).

Работа контура управления ПГС иллюстрируется на примере изменения давления в баке «Г» при проведении огневого испытания УРМ-1 в ФКП «НИЦ РКП».

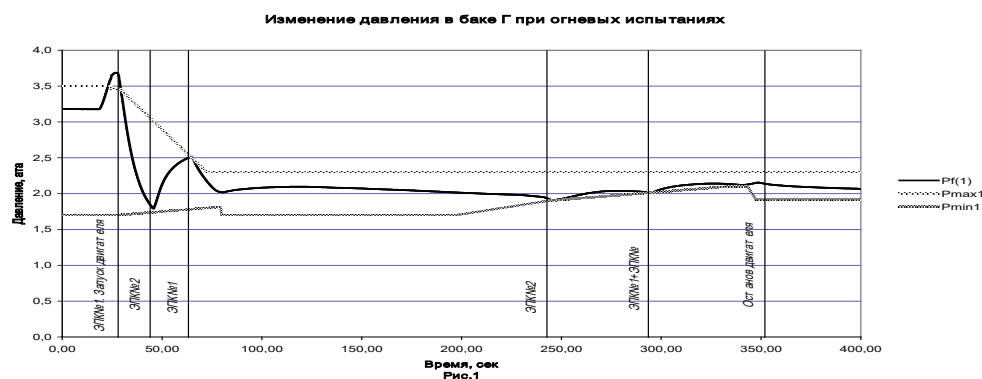


Рис. 6. Работа контура управления ПГС в баке «Г» УРМ-1 при проведении огневого испытания в ФКП «НИЦ РКП»

На рисунке 6 показано изменение давления в баке «Г» по параметру $Pf(1)$, получаемому в «Алгоритме управления ПГС» путем обработки сигнала с датчиков ИСАД — 1ФДБГ в границах регулирования: P_{max1} — верхняя и P_{min1} — нижняя границы регулирования.

Можно видеть, что после двух переключений ЭПК наддува с первого на второй в баке стабилизировалось давление, т. е. установился баланс между расходом гелия в бак через второй ЭПК и расходом керосина в двигатель.

Но несмотря на достаточно высокий уровень развития технологии изготовления металлопленочных тензорезисторных датчиков, актуальной остается проблема обеспечения долговременной стабильности их выходных параметров. Так в эксплуатационной документации на бортовую аппаратуру ИСАД завод-изготовитель (ЗИ) установил межповерочный интервал 6 месяцев, по истечении которого производитель не может гарантировать заявленную точность измерений функциональных датчиков. Крайняя калибровка ФД проводится перед проведением электрических испытаний РН на ЗИ. Если учесть, что электрические испытания на предприятии длятся от 3 до 4 месяцев, и к этому времени прибавить время на приемку РН представителями ВП МО, транспортировку, работы проводимые на ТК РН, то к пуску РН на универсальном стартовом комплексе 14П221 мы можем подойти с истекшими сроками поверки, а следовательно измерения будут недостоверными, что может привести к неудачному пуску РКН. Данная проблема влечет за собой повторную тарировку ИК и увеличение сроков подготовки РН.

Стабильность тонкопленочных ТР определяется в большей степени наличием скрытых дефектов тонкопленочной структуры интегрального чувствительного элемента, которые обусловлены:

- исходным состоянием рабочей поверхности упругих элементов (риски, царапины не исчезающего характера после полировки, структурные дефекты самого материала упругого элемента);
- дефектами, привносимыми непосредственно самим процессом напыления диэлектрического и тензорезистивного материала (поры в изолирующем и резистивном слоях тонкопленочной структуры, образующиеся при взаимодействии частиц напыляемого материала с остаточными газами в рабочем объеме вакуумной камеры и на поверхности упругого элемента). [3]

Для повышения точности изготовления и увеличения межповерочных интервалов необходимо внедрение технологии импульсной обработки.

Данная технология заключается в воздействии импульсных электрических нагрузок, который позволяет проводить структурирование резистивного слоя (отжигать дефекты в пленке, упорядочивать структуру пленки в зонах со скрытыми дефектами), юстировку величины сопротивления резисторов до требуемого номинального значения без изменения их геометрии, а также отбраковывать потенциально ненадежные резисторы с «критичными» дефектами резистивного слоя. [3]

Использование данной технологии улучшит метрологические характеристики измерительных каналов ИСАД, приведет к повышению стабильности системы и увеличению межповерочных интервалов.

Литература:

1. Измерительная система абсолютного давления. Руководство по эксплуатации СДАИ.411711.014 РЭ. — Текст: непосредственный.
2. Технологические приемы достижения долговременной стабильности чувствительных элементов металл плёночных датчиков давления ДАВ-88. — Текст: электронный // <https://elibrary.ru/item.asp?id=12533874>
3. Способы повышения стабильности тонкопленочных тензорезисторов. — Текст: электронный // <https://rucont.ru/efd/599156>

Необходимость контроля спектрального состава освещения рабочего места и его поддержание. Искусственное освещение

Бакунова Виктория Сергеевна, студент

Научный руководитель: Ковалева Мария Сергеевна, ассистент

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

В современном и технологично развитом мире, где большая часть жизни человека проходит на рабочем месте, освещение играет важнейшую роль. От его качества зависят настроение, самочувствие и продуктивность работы. Свет является не просто условием видимости, но и мощнейшим сигналом, синхронизирующим наши внутренние биологические часы — циркадные ритмы. Нарушение этой синхронизации из-за неоптимального светового режима может приводить к нарушениям сна, снижению когнитивных способностей и ухудшению общего состояния здоровья.

В настоящее время по нормам СанПиН рабочее пространство должно быть обеспечено качественным искусственным освещением, которое подразделяют:

- рабочее;
- аварийное;
- эвакуационное;
- охранное;

— дежурное.

Все виды освещения должны быть сбалансированы и обеспечивать комфортные условия для работы, удовлетворяющие нормам СанПиН: не менее 300 лк для общего и не менее 500 лк для местного освещения. Для источников света нормируется также цветовая температура (диапазон от 2400 до 6800 К) и пульсация освещенности.

Искусственное освещение создается электрическими источниками света, наиболее распространенными из которых являются лампы накаливания, газоразрядные (люминесцентные) и светодиодные (LED) [2].

Существует несколько типов искусственных источников света, различающихся по принципу действия: лампы накаливания (включая галогенные), газоразрядные лампы (люминесцентные, ДРЛ, ДРИ) и светодиодные лампы. Основным современным источником для рабочих мест становятся светодиоды (LED), которые обладают высокой светоотдачей и управляемым спектром.



Рис. 1. Схемы распределения искусственного освещения: а — общее равномерное освещение, б — общее локализованное освещение, в — комбинированное освещение

В свою очередь, по конструктивному исполнению искусственное освещение подразделяется на: общее (равномерное, локализованное), комбинированное (Рис. 2).

Главными преимуществами качественного искусственного освещения являются: независимость от времени суток и погоды, стабильность параметров в заданных пределах, возможность управления спектром. К главным недостаткам традиционного искусственного освещения относятся: пульсация светового потока, оказывающая дополнительную нагрузку на зрение; возможное искажение цветовосприятия в зависимости от типа лампы; необходимость контроля спектрального состава, так как спектр искусственного света по умолчанию отличается от естественного и требует подстройки для комфортной и продолжительной работы.

Спектральный состав естественного освещения — это распределение интенсивности света по различным длинам волн в видимом спектре. Видимый спектр — это диапазон длин волн электромагнитного излучения, которое может воспринимать человеческий глаз, который находится в диапазоне от 400 до 700 нм. Естественное освещение, получаемое от солнца, имеет непрерывный спектр, включающий все длины волн видимого света — от красного до фиолетового.

Рассмотрим спектральный состав по красному диапазону длин волн, 620–750 нм, который изменяется в течение дня. Утром и вечером он имеет большую интенсивность и ощущается более теплым, чем в середине дня, когда он становится более ярким и холодным.

Спектральный состав искусственного освещения — это распределение интенсивности света по различным длинам волн в видимом спектре, которое напрямую зависит от типа источника. Видимый спектр — это диа-

пазон длин волн электромагнитного излучения, которое может воспринимать человеческий глаз, который находится в диапазоне от 380 до 780 нм. В отличие от естественного, имеющего непрерывный спектр, большинство искусственных источников (например, старые люминесцентные лампы) обладают прерывистым (линейчатым) спектром, что на подсознательном уровне может вызывать повышенную утомляемость. В то время как качественные светодиодные лампы могут обеспечить практически равномерный спектр. Далее рассмотрим спектральный состав по красному диапазону длин волн (620–750 нм).

Изменение интенсивности красного диапазона в зависимости от типа лампы и режима ее работы является физиологически значимым процессом для человеческого организма. Этот процесс связан с воздействием света на циркадные ритмы. Наибольшей биологической активностью обладает синий спектр (460–480 нм), подавляющий выработку мелатонина в дневное время. Однако, в вечернее время избыток синего света от экранов и светодиодных ламп с холодным спектром становится вреден. Красный свет имеет большую длину волны и минимально подавляет выработку мелатонина, поэтому увеличение доли красного спектра в искусственном освещении в вечернее время является физиологичным и не нарушает засыпание.

Таким образом, поддержание правильной динамики спектра искусственного света в течение дня является критически важным для здоровья. Преимущество искусственного освещения — его стабильность в любой момент времени, однако его главный недостаток — спектр, не меняющийся естественным образом. Для комфортной и продолжительной работы необходимо не просто под-

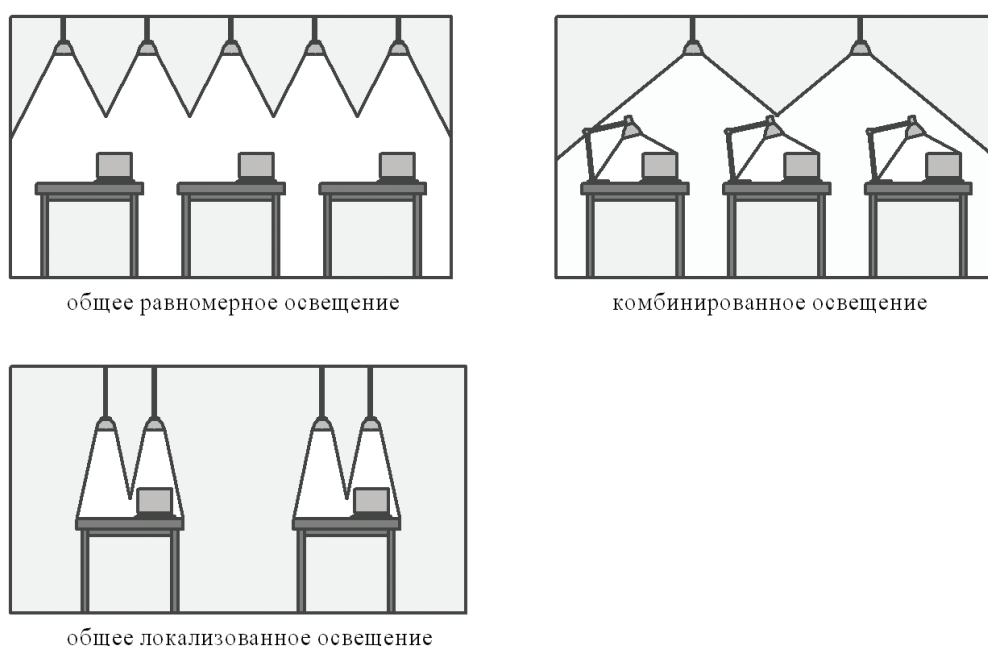


Рис. 2. Схемы распределения искусственного освещения: а — общее равномерное освещение, б — общее локализованное освещение, в — комбинированное освещение

держивать стабильный уровень освещенности, а адаптировать спектральный состав искусственного света к биологическим ритмам человека.

Адаптивное освещение — это система освещения, которая автоматически регулирует параметры освещения (яркость, цвет, направление света) в зависимости от условий окружающей среды и потребностей человека [1]. Одним из примеров может быть система, которая регулирует яркость света в зависимости от уровня естественного освещения, когда его уровень повышается, яркость искусственного освещения снижается, и наоборот. Используя принцип работы данной системы, мы можем перевести регулировку на изменение спектрального состава освещения по красному диапазону длин волн.

Основываясь на принципах биологической значимости спектра, можно предложить концепцию адаптивной системы освещения, направленной на поддержание оптимального уровня красного диапазона в вечернее время. Цель системы — не сделать его одинаковым на протяжении всего дня, что может привести к нарушению циркадных ритмов, а именно компенсировать нежелательные отклонения или усиливать полезные.

В утренние и дневные часы, когда важен высокий уровень синего света для бодрости и поддержания тонуса, система должна работать в режиме «холодного» света (цветовая температура 5000–6500 К). В вечернее же время, для подготовки организма ко сну, система должна переходить в режим снижения цветовой температуры до 2700–3000 К, то есть подавать более теплый свет с повышенным содержанием красного компонента. Для этого необходимо:

1. Выбрать датчики, способные измерять не только общую освещенность, но и соотношение спектральных составляющих, например, отдельные фотодиоды, чувствительные к синему и красному свету, или датчики цветовой температуры.

2. Расположить их в нескольких точках помещения, вблизи рабочей поверхности, для точной оценки световой обстановки и времени суток (через встроенные часы или сенсоры внешнего света).

3. Настроить алгоритм работы так: от 6:00 до 12:00 — плавное повышение цветовой температуры до максимума; от 12:00 до 17:00 — поддержание высокой цветовой температуры; от 17:00 до 23:00 — плавное снижение цветовой температуры до минимального «теплого» значения с увеличением доли красного спектра, что не будет подавлять естественную выработку мелатонина.

Литература:

1. Колтун А. Ю., Масло И. А. Адаптивное освещение и безопасность движения. — 2019.
2. РосАвтодор Естественное и искусственное освещение: актуализированная редакция СНиП 23–05–95.

Адаптивная система освещения на красном диапазоне спектра представляет собой инновационную технологию, которая исследуется и может внедряться в различных областях, начиная от домашнего пространства и заканчивая рабочими помещениями [1]. Однако, как и любая технология, она имеет свои недостатки и преимущества, о которых не стоит забывать.

Так к преимуществам можно отнести:

1. Улучшение здоровья: красный свет, может положительно влиять на циркадные ритмы, сон и эмоционально состояние.

2. Энергосбережение: использование энергоэффективных светодиодных светильников с возможностью автоматического снижения яркости, когда это необходимо, продлевает срок службы и экономит электроэнергию.

3. Увеличение производительности: некоторые исследования показывают, что правильное освещение, включая красный свет, может повысить концентрацию и производительность работников.

К недостаткам следует отнести:

1. Высокие затраты на внедрение: одним из основных недостатков являются высокие начальные затраты на ее внедрение и установку, особенно в сравнении с традиционными системами освещения.

2. Сложность настройки и обслуживания: настройка сценариев динамического освещения и калибровка датчиков требуют специальных знаний, что усложняет эксплуатацию.

3. Ограниченные исследования: хотя теория циркадных ритмов подтверждена, долгосрочные эффекты от длительного использования именно динамического искусственного освещения (в отличие от естественного) продолжают активно изучаться.

Адаптивная система освещения, управляющая не только яркостью, но и спектральным составом света, представляет собой перспективную технологию, нацеленную на создание по-настоящему комфортной и здоровой среды для человека [1]. Ориентация на поддержание естественной динамики красного и синего диапазонов позволяет синхронизировать искусственную световую среду с биологическими ритмами, снижая нагрузку на зрение при чтении и другой когнитивной работе. Несмотря на высокую начальную стоимость и сложность внедрения, дальнейшее развитие технологий и накопление научных данных, несомненно, будут способствовать повышению эффективности, надежности и доступности таких систем в будущем.

Анализ влияния шумов фотоприемного тракта на порог обнаружения слабоконтрастных объектов в оптико-электронных системах специального назначения

Буюк Владислав Павлович, студент

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

Рассмотрено влияние шумов фотоприемного тракта и неоднородности чувствительности элементов матричного фотоприемного устройства (МФПУ) на порог обнаружения слабоконтрастных объектов в оптико-электронных системах специального назначения.

Ключевые слова: оптико-электронная система, матричное фотоприемное устройство, фотоприемный тракт, шум, неоднородность чувствительности.

Оптико-электронные системы специального назначения применяются для наблюдения, поиска, сопровождения и идентификации объектов при малом энергетическом контрасте. В инфракрасных ОЭС предельные характеристики во многом определяются параметрами фотоприемного тракта, где формируется отношение полезного сигнала к помехам. При обнаружении слабоконтрастных объектов существенны не только шумы, но и пространственная неоднородность параметров МФПУ.

Даже при высоком уровне развития фотоприемников сохраняется проблема неоднородности чувствительности фоточувствительных элементов, проявляющаяся как различие коэффициентов преобразования излучения в электрический сигнал по матрице [1, с. 123]. Эта неоднородность представляет собой мультипликативную помеху, в отличие от темнового тока и аддитивных шумов. Если аддитивные помехи смещают распределение сигнала, то мультипликативные изменяют масштаб полезного отклика, из-за чего одинаковый объект формирует разный выходной сигнал на разных элементах [2, с. 34].

Выходной сигнал $i_k k$ -го элемента МФПУ представим в виде

$$i_k = g_k s + d + x_k,$$

где g_k — коэффициент чувствительности элемента, s — полезный сигнал, d — темновой ток, x_k — шум. После компенсации темновой составляющей определяющими факторами остаются шумы фотоприемного тракта и разброс коэффициентов g_k . Относительный коэффициент чувствительности определяется как

$$g_k = \frac{U_k}{U_{\max}},$$

где U_k — сигнал k -го элемента, U_{\max} — максимальный сигнал по матрице.

Для инфракрасных ОЭС важнейшим показателем является минимальная температура объекта, обеспечивающая обнаружение. Выходной сигнал от объекта связан со спектральной плотностью энергетической светимости:

$$s = K_I M_e(\Delta, \lambda T), \quad (1)$$

где K_I — совокупный коэффициент, учитывающий параметры оптики, спектральной чувствительности, про-

пускания трассы и обработки сигнала. В ограниченном спектральном диапазоне

$$M_e(\Delta, \lambda T) = (\zeta_2 - \zeta_1) \sigma T^4 \varepsilon(\Delta, \lambda T), \quad (2)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана, ε — коэффициент излучения объекта. Тогда

$$s = K_I K_2 T^4, \quad (3)$$

$$T^4 = \frac{s}{K_I K_2}. \quad (4)$$

Соотношение (4) задаёт связь между пороговым электрическим сигналом и пороговой температурой обнаружения.

В гауссовой модели аддитивного шума вероятность правильного обнаружения без компенсации неоднородности задаётся выражением

$$P_{d,k} = 1 - \Phi\left(\Phi^{-1}(\alpha) - \frac{g_k s}{\sigma}\right), \quad (5)$$

где $\Phi(\cdot)$ — функция стандартного нормального распределения, α — вероятность ложной тревоги, σ — среднеквадратическое отклонение шума. Пороговый сигнал для k -го элемента равен

$$s_{th,k} = \frac{\sigma}{g_k} \Phi^{-1}(\alpha). \quad (6)$$

Из (6) следует, что уменьшение чувствительности элемента приводит к росту порогового сигнала. Это означает снижение вероятности обнаружения слабоконтрастного объекта в областях матрицы с меньшим g_k даже при неизменном уровне шума [3, с. 13].

При компенсации неоднородности чувствительности выполняется нормировка по g_k :

$$P_{d,k}^{(c)} = 1 - \Phi\left(\frac{(\sigma/g_k)\Phi^{-1}(\alpha) - s}{\sigma/g_k}\right), \quad (7)$$

$$s_{th,k}^{(c)} = \frac{\sigma}{g_k} \Phi^{-1}(\alpha). \quad (8)$$

Сопоставление (6) и (8) показывает, что компенсация не изменяет пороговый сигнал для конкретного элемента. Она выравнивает средний отклик, но не устраняет тот факт, что шум после нормировки усиливается тем же коэффициентом, что и полезный сигнал.

Для идеализированного однородного фотоприемника ($g_k = 1$) из (4) и (6) получаем пороговую температуру:

$$T_{th} = \left(\frac{\sigma \Phi^{-1}(\alpha)}{K_1 K_2} \right)^{1/4}. \quad (9)$$

С учётом неоднородности чувствительности для k -го элемента

$$T_{th,k} = \left(\frac{\sigma \Phi^{-1}(\alpha)}{K_1 K_2 g_k} \right)^{1/4}. \quad (10)$$

Формула (10) показывает, что пороговая температура зависит от чувствительности как $g_k^{-1/4}$. Даже умеренный разброс чувствительности вызывает заметную неравномерность минимальной температуры обнаруживаемого объекта по полю матрицы.

Отношение максимальной и минимальной пороговых температур определяется как

$$\frac{T_{max}}{T_{min}} = \left(\frac{g_{max}}{g_{min}} \right)^{1/4}. \quad (11)$$

Коэффициент неоднородности чувствительности задаётся выражением

$$\Delta = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} = \frac{g_{max} - g_{min}}{g_{max} + g_{min}},$$

откуда

$$\frac{g_{max}}{g_{min}} = \frac{1 + \Delta}{1 - \Delta},$$

и, следовательно,

$$\frac{T_{max}}{T_{min}} = \left(\frac{1 + \Delta}{1 - \Delta} \right)^{1/4}. \quad (12)$$

Выражение (12) является итоговой аналитической оценкой влияния неоднородности чувствительности на пороговую температуру обнаружения. Таким образом, шум фотоприемного тракта влияет на порог через параметр σ , а неоднородность чувствительности — через g_k . Рост σ повышает порог для всех элементов, тогда как разброс g_k создаёт локальные зоны пониженной и повышенной чувствительности. Это особенно критично при обнаружении малоразмерных и слабоконтрастных объектов, проецирующихся на небольшое число элементов [4, с. 8].

Для точечных и квазиточечных объектов ситуация наиболее неблагоприятна: если объект попадает на элемент с пониженной чувствительностью, отношение сигнал/шум уменьшается, а вероятность пропуска возрастает. Для протяжённых малоразмерных объектов неоднородность дополнительно искажает пространственное распределение сигнала, что снижает устойчивость алгоритмов распознавания.

Литература:

1. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения; под ред. П. Йесперса, Ф. Ван де Виле, М. Уайта. М.: Мир, 1979. 574 с.

Практическая оценка показывает, что для современных матричных ФПУ дальнего ИК-диапазона коэффициент неоднородности может достигать $\Delta = 0,15$. Тогда из (12)

$$\frac{T_{max}}{T_{min}} = \left(\frac{1,15}{0,85} \right)^{1/4} \approx 1,078.$$

Разброс пороговой температуры составляет около 7,8 %. При $\Delta = 0,10$

$$\frac{T_{max}}{T_{min}} = \left(\frac{1,10}{0,90} \right)^{1/4} \approx 1,051,$$

то есть около 5 %. Для объектов с малым температурным контрастом этого достаточно для перехода от уверенного обнаружения к пропуску на части поля зрения.

Алгоритмическая компенсация НЧФ улучшает визуальную однородность изображения и уменьшает фиксированный структурный шум, однако не повышает предельную обнаружительную способность автоматически. Если коррекция выполняется делением на g_k , аддитивный шум на малочувствительных элементах также усиливается, поэтому их порог обнаружения в терминах температуры остаётся повышенным.

Следовательно, при проектировании фотоприемного тракта необходимо контролировать не только среднеквадратический шум, но и пространственный разброс коэффициентов чувствительности. Для систем, ориентированных на предельные дальности обнаружения, снижение Δ сопоставимо по значимости со снижением σ . Формулы (9)–(12) позволяют уже на этапе предварительного проектирования оценивать допустимые уровни шума и неоднородности чувствительности по критерию пороговой температуры без полного имитационного моделирования.

Итак, аддитивные шумы задают общий уровень порогового сигнала, а мультипликативная неоднородность чувствительности формирует пространственный разброс пороговой температуры обнаружения [5, с. 14]. Для k -го элемента матрицы

$$T_{th,k} \sim g_k^{-1/4},$$

а относительная неравномерность пороговой температуры определяется выражением

$$\frac{T_{max}}{T_{min}} = \left(\frac{1 + \Delta}{1 - \Delta} \right)^{1/4}.$$

При коэффициенте неоднородности 10 % разброс пороговой температуры составляет около 5 %, а при 15 % — почти 8 %. Эти значения достаточны для заметного ухудшения вероятности обнаружения слабоконтрастных объектов и искажения их сигнального образа. Поэтому учёт НЧФ является обязательным при оценке предельных возможностей инфракрасных ОЭС.

2. Дахин А. М. Методы компенсации геометрического шума матричного фотоприемника в телевизионной камере на основе приборов с зарядовой связью с диодами Шоттки // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Вып. 6. С. 52–58.
3. Сергунов А. А. Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных фотоприемников // Известия вузов, Приборостроение. 2022. Вып. 8 (52). С. 38–42.
4. Закутаев А. А., Рогачев В. А. Влияние неравномерности чувствительности фотоприемника при оценивании характеристик обнаружения оптико-электронных систем // Электрон. науч. журнал «Инженерный вестник Дона», 2018. № 2. 10 с.
5. Рогачев В. А., Закутаев А. А., Колбанев М. О., Лиференко В. Д. Неравномерность чувствительности фотоприемника как мультипликативная помеха при межкадровой обработке в прецизионных телевизионных системах // Информационно-управляющие системы. СПб.: ИУС, 2021. № 2 (87). С. 13–18.

Теоретическая оценка влияния неравномерности темнового тока матричного ИК-фотоприемника на точность обнаружения малоконтрастных объектов в оптико-электронных системах специального назначения

Буяк Владислав Павлович, студент

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

Рассмотрено влияние пространственной неравномерности темнового тока матричного ИК-фотоприемника на вероятность обнаружения малоконтрастных объектов в оптико-электронных системах специального назначения.

Ключевые слова: ИК-фотоприемник, темновой ток, неравномерность сигнала, малоконтрастный объект, обнаружение.

Матричные ИК-фотоприемники применяются в системах, где цель имеет низкий энергетический контраст относительно фона. В таких условиях качество обнаружения определяется не только шумом, но и квазидетерминированными составляющими сигнала, прежде всего пространственной неравномерностью темнового тока. Она проявляется как фиксированный рисунок, сохраняющийся от кадра к кадру и искажающий локальные перепады яркости, по которым выделяется объект.

В системах специального назначения задача осложняется тем, что объект часто занимает малое число элементов матрицы и обладает низким температурным или энергетическим контрастом [1, с. 17]. Поэтому даже после стандартной коррекции остаточная неравномерность перестает быть второстепенной: она попадает в ту же полосу пространственных частот, что и сигнал объекта, и снижает достоверность обнаружения [2, с. 74].

Выходной сигнал элемента матрицы с координатами (i, j) можно представить как

$$U(i, j) = S(i, j) + D(i, j) + N(i, j),$$

где $S(i, j)$ — полезный сигнал, $D(i, j)$ — темновой сигнал, $N(i, j)$ — шум. Темновой сигнал задается в виде

$$D(i, j) = \bar{D} + \delta D(i, j),$$

а после коррекции остается остаточная компонента

$$\delta D_r(i, j) = \delta D(i, j) - \delta D_c(i, j),$$

которая в реальных условиях не равна нулю из-за температурной зависимости, дрейфа смещений, различий каналов считывания и нелинейности тракта.

Для малоконтрастного объекта информативным параметром является разность сигналов объекта и фона:

$$\Lambda = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{(i,j) \in \Omega} U(i, j) - \frac{1}{|\Gamma|} \sum_{(i,j) \in \Gamma} U(i, j).$$

При отсутствии объекта

$$\Lambda_0 = \Delta D_r + \Delta N,$$

а при наличии объекта

$$\Lambda_1 = \Delta S + \Delta D_r + \Delta N,$$

где ΔS — полезный контрастный сигнал, ΔD_r — вклад остаточной неравномерности, ΔN — шум. Следовательно, неравномерность темнового тока одновременно увеличивает дисперсию статистики решения и смещает её среднее значение. Для автоматических алгоритмов это меняет пороговое распределение, а для оператора создаёт ложные контрсты и маскирует слабые объекты [3, с. 9].

Если шум имеет дисперсию σ_N^2 , а остаточная неравномерность — σ_D^2 , то эффективная дисперсия равна

$$\sigma_{\text{eff}}^2 = \sigma_N^2 + \sigma_D^2,$$

а эффективное отношение сигнал/шум:

$$q = \frac{\Delta S}{\sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_D^2}}.$$

При $\sigma_D = \sigma_N$ величина q уменьшается в $\sqrt{2}$ раза, что особенно существенно для малоконтрастных объектов. В гауссовском приближении вероятность обнаружения определяется выражением

$$P_d = Q(Q^{-1}(P_f) - q),$$

поэтому уменьшение q напрямую ухудшает характеристики обнаружителя.

Особенно важна не только амплитуда, но и пространственная структура остаточной неравномерности. Фиксированный рисунок часто имеет строчную, столбцовую или смешанную форму, поэтому энергия помехи сосредоточена в ограниченной области пространственных частот. Если спектр объекта пересекается с этой областью, ухудшение обнаружения оказывается сильнее, чем следует из оценки только по дисперсии [4, с. 87]. Это описывается через выход пространственного фильтра:

$$\sigma_{D,\text{out}}^2 = \iint |H(v_x, v_y)|^2 G_D(v_x, v_y) dv_x dv_y.$$

Даже при малой полной энергии помехи выходная дисперсия может быть значительной, если максимум G_D лежит в полосе пропускания фильтра.

Дополнительная ошибка связана с зависимостью темнового тока от температуры и режима считывания:

$$I_d(i, j, T) = I_0(i, j) \exp\left(-\frac{E_a(i, j)}{kT}\right) + I_{\text{add}}(i, j, T).$$

Из-за разброса параметров двухточечная коррекция не устраняет неравномерность во всём диапазоне, а после калибровки при температуре T_c остаток можно оценить как

$$\delta D_r(i, j, T) \approx \left. \frac{\partial D(i, j, T)}{\partial T} \right|_{T=T_c} (T - T_c) + \varepsilon_{nl}(i, j, T).$$

Для количественной оценки вводится коэффициент

$$K_r = \frac{\sigma_D}{\Delta S}.$$

При $K_r < 0.1$ влияние мало, при $K_r \sim 0.3$ искажение уже заметно, а при $K_r \geq 1$ амплитуда остаточной неравномерности сравнима с сигналом объекта, что делает обнаружение неустойчивым. Для систем специального назначения рабочая область должна быть существенно ниже единицы.

При усреднении по m элементам объекта и n элементам фона шум уменьшается как

$$\sigma_N^{(av)} = \sigma_N \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n}},$$

однако для фиксированного рисунка такого ослабления может не быть:

$$\sigma_D^{(av)} \approx \sigma_D.$$

Следовательно, накопление эффективно подавляет случайный шум, но не пространственную неравномерность; напротив, фиксированный рисунок становится более заметным. Для оператора это проявляется в виде ложных полос и пятен, а для алгоритмов — в искажении локальных дескрипторов и снижении переносимости моделей между матрицами и режимами охлаждения [5, с. 13].

Минимальный обнаруживаемый контраст возрастает по закону

$$C_{\min} = C_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_D}{\sigma_N}\right)^2},$$

где C_0 — порог при отсутствии остаточной неоднородности. Поэтому критично не столько абсолютное значение неравномерности, сколько её остаток после коррекции и спектральное совпадение с формой объекта.

Отсюда вытекают требования к калибровке. Двухточечная коррекция эффективна лишь при линейности характеристик и стабильности пространственного рисунка. При изменении амплитуды и формы неравномерности необходима многоточечная коррекция с набором опорных состояний

$$\{D_1(i, j), D_2(i, j) \dots D_k(i, j)\},$$

а также отдельный учёт источников неоднородности. Более полная модель сигнала имеет вид

$$U(i, j) = g(i, j)S(i, j) + b_c(j) + d(i, j) + N(i, j),$$

где $g(i, j)$ — чувствительность, $b_c(j)$ — столбцовое смещение, $d(i, j)$ — собственный темновой сигнал элемента. Для малококонтрастных целей особенно критичны аддитивные составляющие $d(i, j)$ и $b_c(j)$, так как они непосредственно искажают разность между объектом и фоном.

Допустимость остаточной неравномерности можно записать как

$$\sigma_D \leq \alpha \sigma_N,$$

где α определяется требованиями к вероятности пропуска; для устойчивого обнаружения целесообразно принимать $\alpha \leq 0,3$, а для точечных и субпиксельных целей — ещё меньше.

Проведённый анализ показывает, что пространственная неравномерность темнового тока является самостоятельным фактором, ограничивающим обнаружение малококонтрастных объектов. Она снижает эффективное отношение сигнал/шум, повышает порог обнаружения и ухудшает вероятностные характеристики системы. Решающее значение имеет остаточная компонента после коррекции, а не исходный уровень неоднородности. Поэтому наиболее обоснованным способом повышения точности является многоточечная калибровка с отдельным учётом аддитивных и мультипликативных составляющих [6, с. 6].

Перспективным направлением дальнейшего анализа является переход к модели, учитывающей не только дисперсию остаточной неравномерности, но и её полную пространственно-спектральную структуру. Это позволит формулировать количественные требования к фотоприемнику, алгоритмам коррекции и режимам калибровки с учётом вероятности обнаружения объектов заданного масштаба и формы.

Литература:

1. Сергунов А. А. Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных фотоприемников // Известия вузов. Приборостроение. 2021. № 8. Т.52. С.38–42.
2. Хромов Л. И., Лебедев Н. В., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах, М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
3. Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И. Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных // Известия вузов. Приборостроение. 2021. № 6. Т.52. С.11–18.
4. Корнышев Н. П. Телевизионная визуализация: учеб. пособие. В. Новгород: НовГУ, 2020. 164 с.
5. Брондз Д. С., Харитонов Е. Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-го порядка [Электронный ресурс] // Журн. радиоэлектроники. 2008. № 11. 29 с. <http://jre.cplire.ru/alt/nov08> (Дата обращения 24.05.2026).
6. Источник абсолютно черного тела АЧТ-6А // Паспорт ЭЛИР 3.036.010 ПС. Новосибирск, НПП «ЭЛИР», 2012. 10 с.

Исследование автоматизированной системы удаленной технической диагностики поверхностей нагрева котла

Гафаров Артур Рустемович, студент магистратуры
Башкирский государственный аграрный университет (г. Уфа)

В условиях современной энергетики надежность работы котельного оборудования напрямую зависит от своевременного выявления дефектов поверхностей нагрева. Традиционные методы контроля часто требуют остановки агрегата и непосредственного участия персонала в опасных зонах. В данной работе представлено исследование автоматизированной системы, позволяющей проводить диагностику состояния труб экранов, пароперегревателей и экономайзеров в удаленном режиме. Рассмотрены архитектура системы, методы сбора и передачи данных (тепловизионный контроль, акустическая эмиссия), а также алгоритмы программной обработки информации для прогнозирования остаточного ресурса.

Ключевые слова: котельный агрегат, поверхности нагрева, техническая диагностика, удаленный мониторинг, тепловизионный контроль, акустическая эмиссия, прогнозирование ресурса, IoT в энергетике.

Введение. Поверхности нагрева котла являются наиболее теплонапряженными элементами парового или водогрейного котла. Условия их эксплуатации характеризуются высокими температурами, давлением и коррози-

онно-активной средой. Основными видами повреждений являются: ползучесть металла, коррозионное растрескивание, эрозионный износ, усталостные трещины. Аварийный выход из строя труб поверхностей нагрева при-

водит к внеплановым остановам оборудования, что влечет за собой значительные экономические потери для генерирующих предприятий.

Традиционные методы дефектоскопии (ультразвуковая толщинометрия, магнитопорошковый контроль) являются локальными и требуют установки лесов, вскрытия обмуровки и допуска персонала к контролируемым участкам. Это трудоемко, субъективно и не позволяет вести непрерывный мониторинг в процессе работы котла. Развитие технологий промышленного интернета вещей (IIoT) и методов машинного зрения открывает новые возможности для создания автоматизированных систем удаленной диагностики, способных в реальном времени оценивать техническое состояние металла и окислы.

Цель. Исследование автоматизированной системы удаленной технической диагностики поверхностей нагрева котла.

Задачи: На основе анализа статистики отказов котельных агрегатов установлено, что наиболее информативными параметрами, характеризующими предаварийное состояние труб поверхностей нагрева, являются: температурные аномалии — локальные повышения температуры стенки трубы, вызванные отложениями (накипью) или нарушением циркуляции теплоносителя; акустические сигналы — высокочастотные шумы, сопровождающие образование и развитие микротрещин, а также истечение среды через свищи; геометрические изменения деформации труб.

Для диагностики поверхностей нагрева используются тепловизионные датчики и пирометры, для контроля температуры наружной поверхности труб в зонах интенсивного нагрева применяются стационарные тепловизоры с матрицами неохлаждаемого типа.

Для регистрации ультразвуковых волн, возникающих при развитии трещин и истечении среды, применяются пьезоэлектрические преобразователи. Частотный диапазон выбирается в пределах 50–500 кГц, что позволяет отсекают низкочастотные шумы горелок и газовоздушного тракта. Датчики акустической эмиссии крепятся непосредственно к трубам или к металлическим волноводам, привариваемым к поверхностям нагрева.

Для коррекции диагностических моделей и верификации данных используются: датчики давления и температуры теплоносителя, датчики вибрации для контроля общей вибрации труб, что косвенно свидетельствует о пульсациях потока или механических повреждениях креплений.

Все датчики подключаются к распределенным модулям ПЛК, размещенным в металлических шкафах вблизи котла. Аналоговые сигналы термопар и пирометров заводятся на модули ввода аналоговых сигналов с гальванической развязкой. Для термопар обязательна компенсация температуры холодного спая. Ethernet используется для подключения тепловизоров, которые формируют видеопоток. Тепловизоры подключаются по оптоволокну или

экранированной витой паре. Беспроводное подключение применяется для датчиков, установленных в труднодоступных местах, где прокладка кабеля экономически нецелесообразна. Используются протоколы WirelessHART и LoRaWAN. Беспроводные датчики питаются от литиевых батарей с длительным сроком службы или от термоэлектрических генераторов, использующих перепад температур на поверхности трубы.

Контроллеры выполняют первичную фильтрацию сигналов: усреднение, отбраковку выбросов, преобразование единиц измерения. Для сигналов акустической эмиссии используется быстродействующий АЦП с частотой дискретизации не менее 1 МГц и аппаратная реализация фильтров нижних и верхних частот. Программа автоматически выделяет контуры труб, сопоставляя текущее тепловизионное изображение с эталонной моделью расположения труб (цифровым двойником участка). Для каждой трубы строится профиль температуры вдоль оси. Обнаружение локальных перегревов (превышение средней температуры по участку более чем на 20°C) инициирует сигнал тревоги. Дополнительно анализируется динамика изменения температуры во времени — быстрое нарастание температуры характерно для закупорки трубы. Для выделения полезного сигнала из шума сигналов акустической эмиссии применяется вейвлет-преобразование. Высокочастотные составляющие, соответствующие актам эмиссии, накапливаются. По разнице времени прихода сигнала на несколько датчиков определяется зона возникновения дефекта. Интенсивность эмиссии коррелирует со скоростью развития трещины.

Данные от всех типов датчиков объединяются в единой базе. На основе статистических моделей и методов машинного обучения (регрессионный анализ, нейронные сети) рассчитывается прогнозируемый остаточный ресурс участка поверхности нагрева. Модель учитывает нагрузку, количество пусков-остановов, текущие температурные режимы и выявленные аномалии.

Вывод: Применение комбинации методов тепловизионного контроля и акустической эмиссии в рамках единой автоматизированной системы позволяет достоверно выявлять дефекты на ранней стадии их развития без необходимости останова котла.

Использование алгоритмов сравнения текущих параметров с эталонной математической моделью (цифровым двойником поверхности нагрева) повышает точность прогнозирования остаточного ресурса и позволяет перейти от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому техническому состоянию.

Внедрение подобных систем позволяет снизить трудозатраты на диагностику и минимизировать риск травматизма персонала при проведении контрольных операций в котле.

Перспективой дальнейших исследований является интеграция нейросетевых алгоритмов для автоматической классификации типов дефектов по термографическим изображениям.

Литература:

1. Серьезнов, А. Н. Акустическая эмиссия: физические основы, приборы и применение в диагностике оборудования / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова. — Москва: Спектр, 2020. — 340 с. — ISBN 978–5–990–1234–5–6.
2. Дмитриев С. А. Методы неразрушающего контроля в теплоэнергетике: учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2021. — 168 с.
3. Кузнецов Н. М. Промышленные сети и интерфейсы: учебник. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 256 с.

Повышение эффективности диагностики поверхностей нагрева котла на основе мультипараметрического анализа потока

Гафаров Артур Рустемович, студент магистратуры
Башкирский государственный аграрный университет (г. Уфа)

В статье рассматривается подход к созданию автоматизированной системы удаленной технической диагностики поверхностей нагрева котла. Предлагается метод, основанный на установке трех типов датчиков (давление, температура, расход) до и после ключевых теплообменных элементов: экономайзера, пароперегревателя и водоподогревателя. Описан принцип сравнения дифференциальных параметров и методика прогнозирования остаточного ресурса металла на основе тепловых и гидравлических потерь.

Ключевые слова: автоматизированная система диагностики, поверхности нагрева котла, экономайзер, пароперегреватель, водоподогреватель, удаленная техническая диагностика.

Поверхности нагрева котла (экономайзер, пароперегреватель, водоподогреватель) работают в экстремальных условиях высоких температур и давлений. Основные дефекты — отложения накипи, коррозия, эрозия и усталость металла. Традиционный контроль (периодические остановки и визуальный осмотр) не позволяет получить актуальную картину изменений в реальном времени и, как следствие, часто приводит к аварийным остановкам или необоснованному списанию ресурса [2].

Предлагаемая архитектура диагностической системы

Ключевое нововведение — сравнительный анализ параметров потока теплоносителя на входе и выходе каждого элемента. Для этого до и после каждого узла монтируются идентичные комплекты датчиков:

- Датчик давления (P_1, P_2) — контроль гидравлического сопротивления.
- Датчик температуры (T_1, T_2) — контроль эффективности теплопередачи.
- Счетчик расхода (G_1, G_2) — контроль проходного сечения и перепусков.

Примечание: для пароперегревателя необходимо использовать расходомеры пара с поправкой на плотность [3].

Методика обработки данных и критерии состояния

Система работает в двух режимах: оперативный контроль и прогнозный анализ. Сравнение значений «до/после» позволяет выявить три основных вектора деградации.

Оценка загрязнения и накипобразования (на основе ΔT)

Изменение температурного напора между газами и теплоносителем сигнализирует о термическом сопротивлении слоя отложений.

- Критерий: $\delta_T = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$ (для водоподогревателя и экономайзера).
- Признак неисправности: снижение δ_T при неизменном расходе топлива → падение тепловосприимчивости → необходимость химической промывки.

Оценка гидравлического сопротивления (на основе ΔP)

Перепад давления — прямой индикатор сужения проходных сечений и накопления шлама.

- Критерий: $\Delta P = P_{вх} - P_{вых}$
 - Признак: рост ΔP более чем на 15–20 % от паспортного значения сигнализирует о закупорке труб.
 - Особенность для пароперегревателя: резкое снижение $\Delta P \Delta P$ может указывать на трещину или свищ.
- Оценка расхода как верификатор целостности
- Сравнение показаний расходомеров до и после узла.
- Критерий: $G_1 \approx G_2$ (несжимаемая жидкость) или с учетом фазового перехода.
 - Признак: расхождение более 5–7 % \rightarrow утечка через повреждение трубного пучка.

Прогнозирование остаточного ресурса

Система использует упрощенную термомеханическую модель [1]. Остаточный ресурс $\tau_{ост}$ инициализируется по скорости деградации трех параметров:

$$\tau_{ост} = f\left(\frac{d\Delta P}{dt}, \frac{dI/K}{dt}, \frac{dG_{\text{дебаланс}}}{dt}\right),$$

Где K — коэффициент теплопередачи, рассчитанный по ΔT .

Алгоритм (встраивается в SCADA-систему):

1. Обучение: первые 100 часов работы запоминаются как «паспортные» значения (чистый котел).
2. Тренды: система строит кривые роста $\Delta P \Delta P$ и падения KK .
3. Пороги: Задаются три уровня:
 - Зеленый (ресурс > 80 %) — без действий.
 - Желтый (20 % < ресурс < 80 %) — планирование ремонта.
 - Красный (ресурс < 5 %) — аварийный останов.

Пример: Если скорость роста $\Delta P \Delta P$ экономайзера составляет 1 % в сутки, а критический порог — +30 %, то прогнозируемый остаток работы — 30 суток.

Преимущества предложенной системы

- Дистанционность: не требуется присутствия персонала у горячего узла.
- Косвенная диагностика: нет необходимости внедрять дорогие ультразвуковые толщинометры (они работают локально, в то время как изменение $\Delta P \Delta P$ интегрально оценивает весь пучок).
- Раннее обнаружение залповых отложений: например, выброса песка или продуктов химической чистки.
- Раздельная ответственность: можно точно локализовать проблему — экономайзер, пароперегреватель или водоподогреватель.

Пример реализации для типового котла ТП-35

При штатной работе после чистки:

- Экономайзер: $\Delta P = 0.12$ МПа, $\Delta T = 45^\circ\text{C}$.
- Пароперегреватель: $\Delta P = 0.08$ МПа.

Через 3 месяца:

- Экономайзер: $\Delta P = 0.18 \Delta$ МПа (+50 %), $\Delta T = 28^\circ\text{C}$.

— Решение системы: желтый уровень, остаточный ресурс 45 дней до критического $\Delta P = 0.25$ МПа. Выдана рекомендация — щелочная промывка.

Внедрение трех датчиков (P , T , расход) до и после каждой поверхности нагрева создает полноценную систему удаленной функциональной диагностики. В отличие от сложных тепловизионных систем, данный метод прост в аппаратной реализации и позволяет не только фиксировать текущие дефекты, но и с высокой точностью прогнозировать остаточный ресурс за счет анализа скорости изменения гидравлических и тепловых характеристик. Рекомендуется для внедрения на ТЭЦ и промышленных котельных как этап перехода к обслуживанию по фактическому состоянию.

Литература:

1. Казаков, В. С. Прогнозирование остаточного ресурса эксплуатации энергетического оборудования / В. С. Казаков, В. И. Слезко // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр.ХП Всерос. науч.-техн. конф. — Воронеж: ВГТУ, 2013. — С.166–167
2. Бородин, Е. Ф. Автоматизация технологических процессов: учебное пособие./Е. Ф. Бородин, Н. М. Недилько — Москва: Агропромиздат, 2006. — 368с.

3. Болотов С.В, Герасименко Н. В. Система оперативного дистанционного контроля состояния пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей с цифровыми датчиками влажности // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. No2 (51).

Динамика автомобиля на повороте: геометрические, физические и технические аспекты безопасности

Гордин Дамиан Дмитриевич, студент;

Симаков Глеб Евгеньевич, студент

Институт транспорта и сервиса г. Сочи (Краснодарский край)

Научный руководитель: Кириллов Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент
Сочинский государственный университет (Краснодарский край)

В статье рассмотрен комплекс процессов, происходящих с автотранспортным средством в момент смены прямолинейного направления движения на криволинейное. Проанализированы геометрия дорожного полотна, влияние переходных кривых на плавность хода, физическая природа центробежных сил, а также особенности работы трансмиссии и автомобильных шин под воздействием боковых нагрузок. Особое внимание уделено факторам безопасности и критическим режимам движения, таким как снос, занос и опрокидывание.

Ключевые слова: автомобильная дорога, динамика автомобиля, поворот, центробежная сила, сцепление, дифференциал, переходные кривые, клотоида, окружность, износ, занос, опрокидывание.

Введение

Движение автомобиля по криволинейной траектории — один из самых сложных и опасных элементов дорожного движения. В отличие от езды по прямой, где основные силы направлены вдоль продольной оси транспортного средства, в повороте на автомобиль начинает действовать сложная система векторов сил (рис. 1). Эти силы стремятся сместить машину с заданной траектории, нарушить её устойчивость и вызвать повышенный износ ключевых узлов.

Понимание динамики автомобиля на повороте необходимо не только инженерам-конструкторам и строителям дорог, но и практикующим водителям. Рост скоростей современных автомобилей и плотности транспортных потоков требует детального научного подхода к анализу устойчивости и управляемости машин в условиях криволинейного движения.

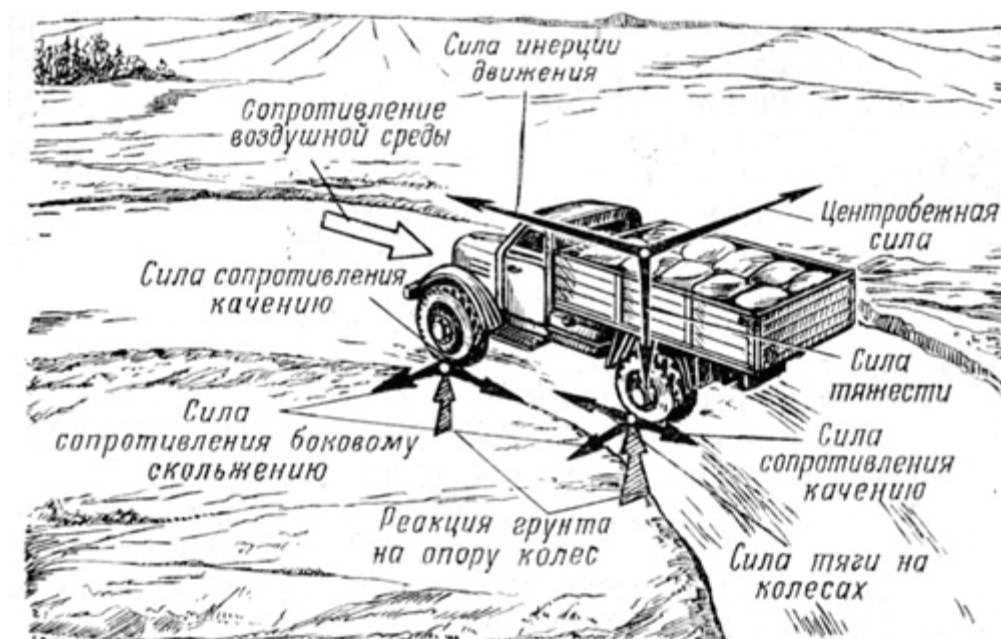


Рис. 1. Силы, действующие на автомобиль на повороте [1]

1. Геометрия криволинейных участков дорог

Конструирование участков дорог, предполагающих изменение направления движения, базируется на строгих математических расчетах [2]. Геометрия поворота определяет, как именно автомобиль будет переходить из стабильного прямолинейного состояния в криволинейное.

1.1. Окружность как базовый элемент

Исторически самым простым способом организации поворота являлось сопряжение двух прямых участков дорог с помощью дуги окружности постоянного радиуса (постоянной кривизны, $R=\text{const}$). Однако с точки зрения динамики такое решение обладает существенным недостатком: при переходе с прямой линии (где радиус кривизны стремится к бесконечности) на дугу окружности (где радиус мгновенно становится конечным) автомобиль испытывает динамический удар. Водитель физически не способен повернуть управляемые колеса мгновенно на требуемый угол. Как результат, в точке сопряжения возникает резкий скачок центробежной силы, который может спровоцировать мгновенную потерю сцепления шин с покрытием.

1.2. Теория переходных кривых

Чтобы сгладить этот переход, в современном дорожном строительстве применяются переходные кривые [2, 3]. Их главная задача — обеспечить плавное, постепенное уменьшение радиуса кривизны от бесконечности до радиуса основной окружности поворота.

Основной переходной кривой является клотоида (спираль Корню) (рис. 2). Математическое уравнение клотоиды задает прямую линейную зависимость между длиной пройденного пути S и кривизной траектории $1/R$ в соответствующей точке (R — текущий радиус кривизны):

$$s \cdot R = C^2, \quad (1)$$

где C — параметр (константа) клотоиды.

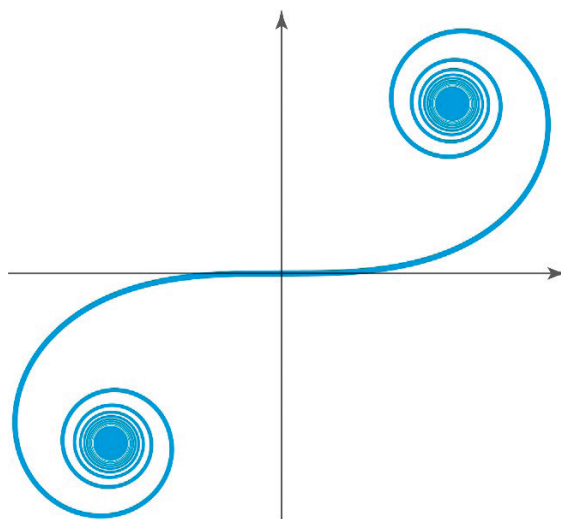


Рис. 2. Клотоида (спираль Корню) [3]

Применение клотоиды дает следующие преимущества:

- **Кинематическое соответствие:** водитель поворачивает рулевое колесо с постоянной угловой скоростью, что соответствует естественной моторике человека.

- **Динамическая плавность:** центробежная сила нарастает пропорционально времени, позволяя элементам подвески плавно сжиматься, распределяя вес машины.

- **Организация виража:** на участке переходной кривой дорожное полотно постепенно меняет свой поперечный профиль с двухскатного на односкатный (вираж), что компенсирует действие боковых сил.

В ряде случаев, например, на железнодорожном транспорте или при проектировании многоуровневых автомобильных развязок в условиях стесненной застройки, могут применяться другие типы переходных кривых: **кубическая парабола** или **лемниската Бернулли**. Лемниската, в частности, эффективна там, где требуется очень быстрое уменьшение радиуса на входе и последующее его увеличение на выходе из петли развязки.

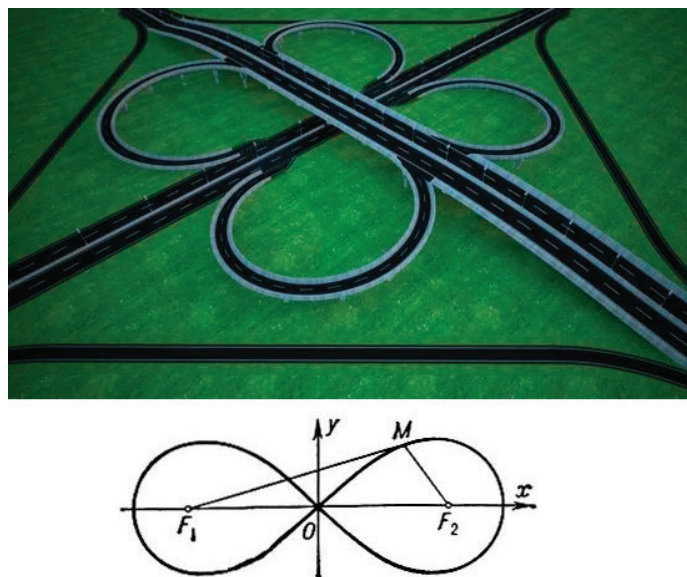


Рис. 3. Лемниската Бернулли [4]

2. Физика криволинейного движения и силы инерции

В основе динамики поворота лежат фундаментальные законы классической механики Ньютона. Как только транспортное средство начинает изменять вектор своей скорости, возникает ускорение, направленное к центру кривизны траектории (центростремительное или нормальное ускорение) (рис. 4).

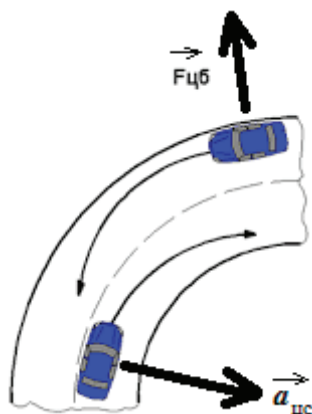


Рис. 4. Центростремительное ускорение и центробежная сила

2.1. Расчет центробежной силы

В неинерциальной системе отсчета, связанной с автомобилем, на него действует виртуальная (псевдосила) **центробежная сила** $F_{цб}$, стремящаяся сместить массу машины наружу от центра поворота (рис. 4). Виртуальной или псевдосилой центробежная сила является в силу того, что она не связана с взаимодействием тел (согласно определению), а с инерцией тела. Она является одной из так называемых сил инерции. Модуль этой силы:

$$F_{цб} = \frac{m \cdot v^2}{R}, \quad (2)$$

где m — полная масса автомобиля (кг); v — линейная скорость движения (м/с); R — текущий радиус кривизны траектории (м).

Анализ формулы показывает, что центробежная сила находится в прямо пропорциональной зависимости от квадрата скорости или, другими словами, квадратичной зависимости от модуля скорости. Это фундаментальный фактор

риска: увеличение скорости движения, например, в 2 раза приводит к четырехкратному росту силы, пытающейся «сбросить» автомобиль с дороги. Увеличение массы автомобиля (например, при полной загрузке) увеличивает силу линейно, однако существенно ухудшает общую управляемость за счет смещения центра тяжести.

2.2. Поперечное (боковое) ускорение

Пассажиры и водитель внутри салона воспринимают центробежную силу через боковое ускорение $a_{цс}$:

$$a_{цс} = \frac{v^2}{R}. \quad (3)$$

Это ускорение и есть упомянутое выше центростремительное или нормальное ускорение (рис. 4).

При проектировании дорог общего пользования инженеры стремятся ограничить величину бокового ускорения значениями $1.5 \div 2.0 \text{ м/с}^2$. Данный порог обусловлен физиологическими особенностями человеческого организма. При превышении этих значений у людей возникает чувство выраженного дискомфорта, нарушается координация, а при длительном воздействии развивается укачивание и утомляемость. В автоспорте, за счет применения специальных анатомических кресел и спортивной подвески, гонщики способны выдерживать боковые ускорения до $40 \div 50 \text{ м/с}^2$ ($4g \div 5g$).

3. Взаимодействие элементов трансмиссии и ходовой части

Поворот автомобиля накладывает специфические требования на работу его механических узлов. Колеса, расположенные на разных сторонах одной оси, в повороте оказываются в неравных условиях. Например, они вынуждены идти по кривым различного радиуса (внешний больше внутреннего) (рис. 5).

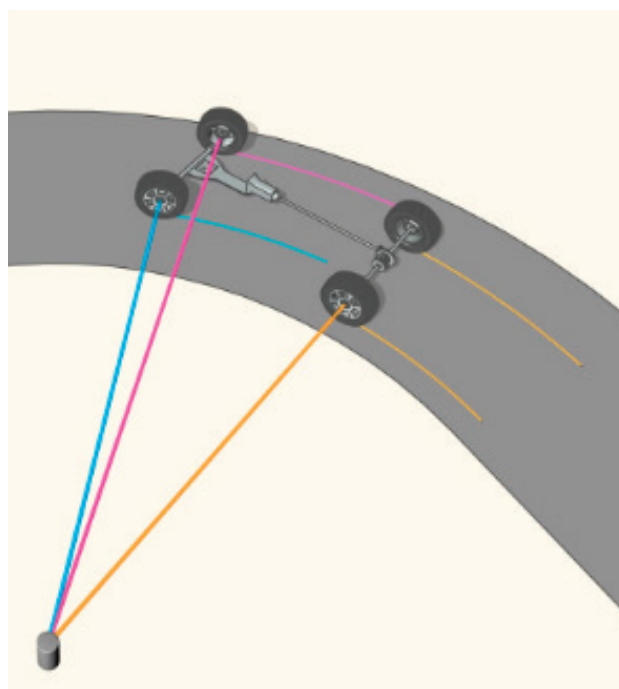


Рис. 5. Разный радиус кривизны траектории для колес на повороте [3]

3.1. Дифференциал и рулевая трапеция

При движении по дуге внешние колеса автомобиля описывают больший радиус (рис. 5) и, следовательно, проходят более длинный путь, чем внутренние колеса. Если бы колеса ведущей оси были жестко связаны между собой единым валом, они были бы вынуждены вращаться с одинаковой угловой скоростью. Это привело бы к неизбежному проскальзыванию одного или обоих колес относительно асфальта (что приводило бы. Например, к повышенному износу протектора шин).

Для устранения этого эффекта применяется **дифференциал** — планетарный механизм, распределяющий крутящий момент между полуосями и позволяющий им вращаться с разными угловыми скоростями (рис. 6).

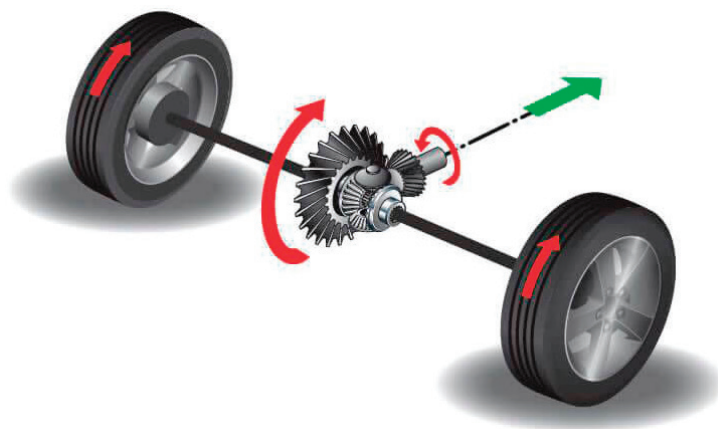


Рис. 6. Дифференциал автомобиля [5]

Кинематическое соотношение угловых скоростей колес:

$$\omega_{\text{внеш}} + \omega_{\text{внутр}} = 2 \cdot \omega_{\text{вал}}, \quad (4)$$

где $\omega_{\text{внеш}}$ и $\omega_{\text{внутр}}$ —угловые скорости внешнего и внутреннего (по отношению к направлению поворота) колес, соответственно; $\omega_{\text{вал}}$ —угловая скорость вала, подающего крутящий момент на дифференциал.

Однако стандартный свободный дифференциал имеет серьезный недостаток в повороте. Под действием центробежной силы автомобиль кренится, разгружая внутреннее колесо. Свободный дифференциал передает одинаковый крутящий момент на оба колеса, но величина этого момента ограничена колесом, имеющим худшее сцепление. Если внутреннее колесо начнет буксовать, внешнее колесо также потеряет тягу. Для борьбы с этим в современных автомобилях применяются системы электронной имитации блокировок (подтормаживание буксующего колеса) или дифференциалы повышенного трения (LSD).

Еще одним из устройств, компенсирующих негативное влияние движения внешнего и внутреннего колеса по разным радиусам, является рулевая трапеция (рис. 7). Благодаря этому, относительно простому устройству, колеса, благодаря которым совершается маневр, поворачиваются под разным углом к направлению движения. Внутреннее колеса поворачивается на угол больший, чем внешнее (рис. 7).

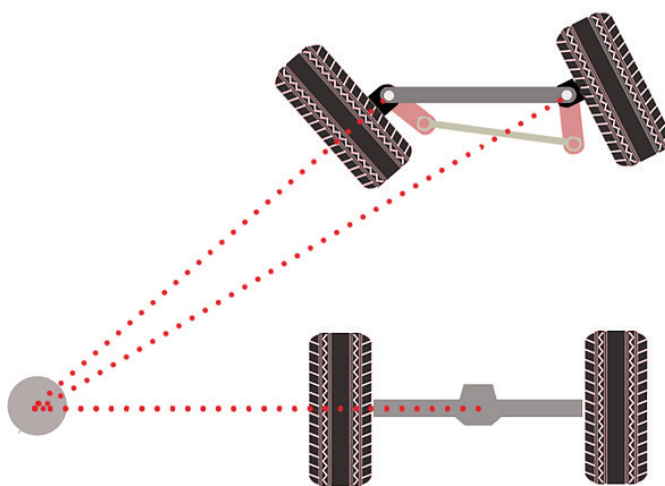


Рис. 7. Рулевая трапеция и поворот колес при маневре [6]

3.2. Деформация и увод автомобильных шин

Шина — единственный элемент, связывающий автомобиль с дорогой. Пятно контакта шины с покрытием в повороте подвергается экстремальным боковым нагрузкам.

Под действием боковой силы происходит эластичная деформация протектора и боковины шины. Этот феномен называется **боковым уводом шины**. Вектор фактического движения колеса отклоняется от направления его геометрической плоскости вращения на некоторый угол (α) (угол увода).

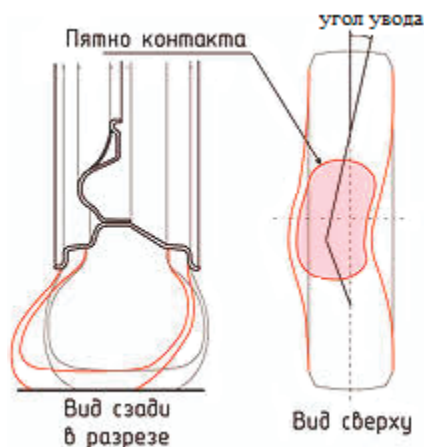


Рис. 8. Боковой увод шины [7]

Если угол увода передней оси превышает угол увода задней оси, автомобиль проявляет тенденцию к *недостаточной поворачиваемости* (стремится распрямить траекторию). Если наоборот — к *избыточной поворачиваемости* (стремится закрутиться внутрь поворота).

Боковые нагрузки вызывают сильное термическое и механическое напряжение в плечевой зоне протектора шины. При регулярном агрессивном прохождении поворотов внешняя кромка беговой дорожки изнашивается неравномерно и в несколько раз быстрее, существенно сокращая общий ресурс покрышки.

4. Безопасность движения и критические режимы

Безопасность автомобиля в повороте жестко лимитирована физическим законом сцепления. Основное правило устойчивости требует, чтобы сдвигающая центробежная сила не превышала предельную силу трения покоя в пятне контакта шин.

4.1. Условие удержания на траектории

В самом упрощенном виде (без учета наклона дороги и перераспределения масс) математическое условие отсутствия заноса выглядит так:

$$\frac{v^2}{R} \leq g \cdot \mu, \quad (5)$$

где $g=9.81$ м/с² — ускорение свободного падения; μ — коэффициент сцепления шины с дорожным покрытием.

Коэффициент μ зависит от вида и состояния дорожного покрытия:

- сухой качественный асфальт — $\mu \approx 0.7 \div 0.8$;
- мокрый асфальт — $\mu \approx 0.4 \div 0.5$;
- укатанный снег — $\mu \approx 0.2$;
- обледенелое покрытие — $\mu \approx 0.1$.

Из (5) можно, например, видеть, что если коэффициент сцепления упал в 8 раз (переход с сухого асфальта на лед), то для сохранения управляемости квадрат скорости должен уменьшиться также в 8 раз, что требует снижения линейной скорости почти в 3 раза.

4.2. Снос передней оси и занос задней оси

При нарушении баланса сил автомобиль может перейти в один из критических режимов (рис. 9).

1. Снос передней оси (недостаточная поворачиваемость): сила инерции превышает силу сцепления управляемых колес. Автомобиль перестает реагировать на поворот руля и продолжает двигаться по касательной к траектории (прямо). Данный режим опасен для рядового водителя, так как инстинктивное желание еще сильнее повернуть руль лишь ухудшает сцепление шин.

2. Занос задней оси (избыточная поворачиваемость): скольжение со срывом колес задней оси. Задняя часть автомобиля стремится обогнать переднюю. Этот режим может быть вызван резким торможением или избытком газа на

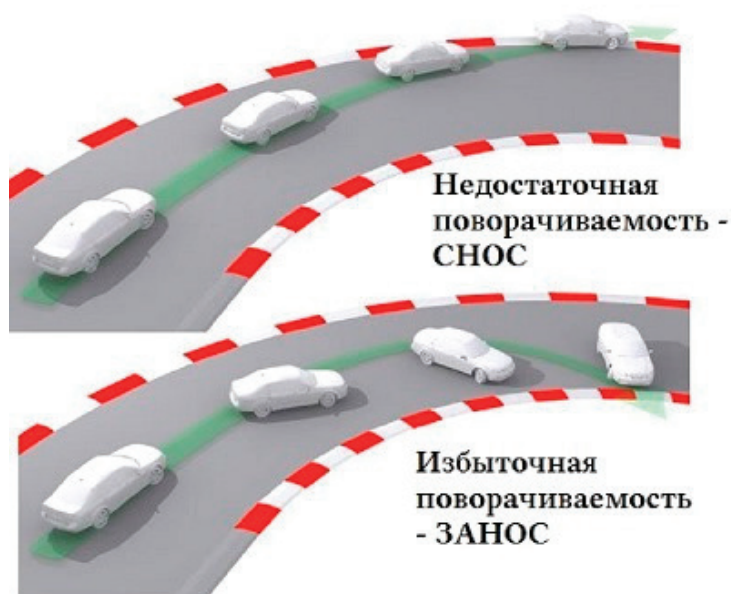


Рис. 9. Критические режимы при повороте автомобиля [8]

заднем приводе. Требуется быстрая и точная корректировка рулем в сторону заноса и дозированной работы педалью акселератора.

4.3. Опрокидывание транспортного средства

Для автомобилей с высоким центром тяжести (внедорожники, грузовики, автобусы) существует риск опрокидывания до момента наступления скольжения колес (рис. 10).

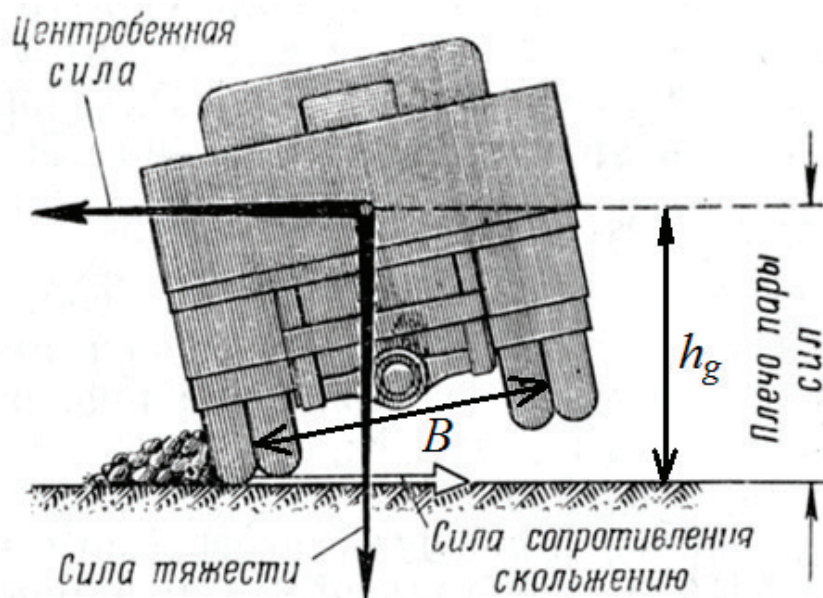


Рис. 10. Действие сил на автомобиль при опрокидывании после потери боковой устойчивости [1]

Опрокидывание происходит, когда результирующий вектор центробежной силы и силы тяжести выходит за пределы колеи автомобиля. Предельная скорость по условию опрокидывания рассчитывается по формуле:

$$v_{\text{опр}} = \sqrt{\frac{g \cdot B \cdot R}{2 \cdot h_g}}, \quad (6)$$

где B — ширина колеи автомобиля, а hg — высота расположения центра тяжести (плечо пары сил на рис. 10), R — радиус поворота. Соответственно, чем выше расположен центр масс автомобиля, тем ниже будет безопасная скорость прохождения изгиба дороги.

5. Современные электронные системы стабилизации

В современном автомобилестроении механические ограничения частично компенсируются активными электронными системами безопасности. Ключевой из них является **система динамической стабилизации (ESC / ESP)**.

ESP непрерывно обрабатывает сигналы с множества датчиков: датчика угла поворота руля, датчиков угловой скорости колес, датчика продольного и поперечного ускорения (акселерометра) и датчика рыскания (угловой скорости вокруг вертикальной оси).

Если электроника обнаруживает расхождение между реальной траекторией движения автомобиля и направлением, заданным водителем с помощью руля, она вмешивается в динамику:

— При фиксации **сноса** передней оси система автоматически подтормаживает внутреннее заднее колесо. Это создает искусственный разворачивающий момент, помогающий «заправить» переднюю часть машины в поворот.

— При фиксации **заноса** задней оси подтормаживается внешнее переднее колесо, гасящее избыточное вращение автомобиля вокруг своей оси.

— При необходимости система принудительно ограничивает подачу топлива, снижая крутящий момент двигателя, независимо от положения педали газа.

Несмотря на высокую эффективность, важно понимать, что электронные ассистенты лишь помогают водителю эффективно использовать имеющийся запас сцепления шин, но они физически не способны обойти фундаментальные законы трения, если скорость входа в поворот была завышена сверх критической отметки.

Заключение

Динамика автомобиля на повороте представляет собой многофакторный процесс, где геометрия дороги, физические законы и конструкция автомобиля связаны в единую систему. Безопасное и эффективное управление транспортным средством требует строгого учета всех описанных факторов.

Проектирование дорог с использованием переходных кривых (клотоид) и правильных виражей существенно сглаживает пиковые нагрузки на автомобиль. Однако ключевым звеном в управлении безопасностью остается водитель. Понимание квадратичной зависимости центробежной силы от скорости и изменчивости коэффициента сцепления шин с дорогой позволяет минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций, продлить ресурс узлов трансмиссии и ходовой части, а также обеспечить максимальный комфорт и безопасность для всех участников дорожного движения.

Литература:

1. Власов Х. В., Евтюхин И. Е., Серебряков Ю. Ф. Вождение автомобиля в сложных условиях. (Издание второе, дополненное). Военное издательство Министерства обороны СССР, Москва, 1964 г.
2. Кармаджян А. Е., Кириллов А. М. Кривые в дорожной отрасли // Молодой ученый. — 2026. — № 14(617). — С. 22–28. — EDN DJAKCG.
3. Математическая составляющая / Н. Н. Андреев, С. П. Коновалов, Н. М. Панюнин и др.; ред.-сост.: Н. Н. Андреев и др. — М.: Фонд «Математические этюды», 2015. — 352 с. — ISBN 978–5–906825–00–1.
4. <https://img.delovoy-saransk.ru/stories/users/3660/klewerjlist.jpg>, <http://mathemlib.ru/mathenc/item/f00/s00/e0000421/index.shtml>
5. <https://personaspb.com/klientam/poleznye-stati/chto-takoe-differencial-v-avtomobile-princip-ego-raboty.html>
6. <https://www.kolesa.ru/article/pochemu-kolesa-pri-povorote-rulya-povorachivayutsya-na-raznyj-ugol>
7. <https://caddy-club.in.ua/threads/Силовой-увод-шин.1510/>
8. <https://www.drive2.ru/b/578987705975702028/>

Противодействие сигналоподобным помехам в современных условиях: когнитивные методы и адаптация пространственно-временной обработки

Энверов Александр Игоревич, преподаватель;

Гусаров Матвей Романович, курсант;

Стычев Роман Иванович, курсант

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны имени маршала Советского Союза Л. А. Говорова (г. Ярославль)

В статье рассматривается эволюция сигналоподобных помех (СПП) в условиях современной радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Проанализирован переход от узкополосных заградительных шумов к интеллектуальным имитационным и ретрансляционным помехам, использующим цифровую радиочастотную память (ЦРЧП). Основное внимание уделено методам пространственно-временной обработки сигналов и когнитивным алгоритмам как основному инструменту противодействия. Предложена архитектура адаптивного приемного тракта, основанная на сочетании ММО-технологий и машинного обучения для селекции помех в условиях априорной неопределенности.

Ключевые слова: радиоэлектронная борьба, сигналоподобные помехи, методы пространственно-временной обработки.

Классическая парадигма помехозащиты, базировавшаяся на расширении спектра (псевдослучайная перестройка рабочей частоты, метод прямой последовательности для расширения спектра) и подавлении узкополосных шумов, теряет эффективность. Современные средства РЭБ противника оснащаются технологиями ЦРЧП, позволяющими когерентно принимать, модифицировать и переизлучать сигнал с задержкой в десятки наносекунд. В результате на входе приемника формируются СПП — высокоррелированные с полезным сигналом излучения, создающие множественные ложные цели или искажающие фазовый фронт волны.

Проблема осложняется внедрением программно-определяемых радиосистем и ростом вычислительных мощностей, что позволяет средствам подавления динамически менять стратегию. Таким образом, задача противодействия СПП является актуальной. Целью работы является систематизация современных методов противодействия СПП с акцентом на переходе от энергетического противодействия к структурно-логическому разделению сигналов в пространстве и времени.

Под СПП понимается электромагнитное излучение, структура которого идентична или квазиидентична полезному сигналу, но несущее дезинформацию или маскирующее цель [1]. В зависимости от способа формирования выделяют три основных класса:

1. Ретрансляционные помехи (Digital Repeater Jamming). Формируются путем захвата зондирующего сигнала РЛС, его усиления и переизлучения с управляемой задержкой. Эффективны против ЛЧМ-сигналов, так как создают опережающие или запаздывающие ложные отметки.
2. Имитационные помехи (Spoofing). Характерны для спутниковых навигационных систем (GPS/GNSS). Подразумевают генерацию копии навигационного сигнала с заведомо ложными координатами, плавно «уводящей» приемник.
3. Интеллектуальные помехи (Smart jamming). Комбинация шума и полезного сигнала, модулированная по сложному закону (например, свертка с псевдослучайной

последовательностью, отличной от кодовой последовательности подавляемой системы).

Ключевой особенностью СПП является их высокая энергетическая скрытность. Для срыва захвата цели или декодирования сообщения не требуется значительного превышения по мощности — достаточно внести когерентные искажения в корреляционный интеграл приемника.

Модель принимаемой смеси на элементах антенной решетки:

$$X(t) = A(\theta_0) \cdot s_0(t) + \sum_{k=1}^K A(\theta_k) \cdot j_k(t) + N(t), \quad (1)$$

где:

$s_0(t)$ — полезный сигнал с направляющим вектором $A(\theta_0)$;

$j_k(t)$ — k -я сигналоподобная помеха, приходящая с направления θ_k ;

$N(t)$ — вектор собственного шума аппаратуры.

Сложность подавления $j_k(t)$ заключается в том, что корреляционная матрица помех R_{jj} вырождена или плохо обусловлена в случае их высокой когерентности с сигналом. Стандартные методы обращения выборочной ковариационной матрицы (алгоритм SMI — Sample Matrix Inversion) требуют предварительного восстановления ранга матрицы, что обычно достигается методами пространственного сглаживания, но ведет к потере эффективной апертуры.

Перспективным подходом является применение многоантенных систем с цифровым формированием луча — ММО-систем. В отличие от аналоговых фазированных решеток, такие системы позволяют формировать независимые пространственные каналы.

Если направление на источник СПП θ_k априорно неизвестно, эффективным методом является пространственная вобуляция. Приемный луч сканирует не плавно, а скачкообразно меняет фазовое распределение. Постановщик помех, использующий ЦРЧП с задержкой переизлучения, не успевает адаптироваться к смене пространственного фильтра, что приводит к рассогласованию

помехи с текущей диаграммой направленности. Это позволяет «сбрасывать» сопровождение ложной цели.

Для подавления когерентных СПП в литературе предложены модификации адаптивных процессоров, использующих алгоритм Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) с декорреляцией. Вектор W_{opt} ищется как решение задачи:

$$\min_W W^H \cdot \tilde{R}_{xx} \cdot W \mid W^H \cdot A(\theta_0) = 1 \quad (2)$$

где \tilde{R}_{xx} — восстановленная (сглаженная) ковариационная матрица.

Для восстановления используется метод аппроксимации Тёплица, основанный на свойстве корреляционных матриц стационарных процессов. Практическое применение данного подхода требует точной калибровки приемных трактов, так как амплитудно-фазовые ошибки резко снижают глубину нуля диаграммы направленности в направлении на постановщик помех.

В условиях, когда помеха полностью повторяет форму полезного сигнала (например, навигационный спуфинг), энергетические и пространственные методы бессильны. В этих случаях требуется анализ тонкой структуры сигнала.

Одним из таких методов является анализ фазового шума и искажений усилителя мощности. Любой передатчик обладает уникальной сигнатурой, обусловленной неидеальностью синтезатора частот и нелинейностью усилителя мощности. Алгоритм идентификации строится на выделении фазовых шумов $\varphi(t)$ с использованием петли Костаса и последующей классификации через сверточные нейронные сети. Исследования показывают, что при отношении сигнал/шум более 10 дБ вероятность правильной идентификации легитимного спутника GPS достигает 0.99 даже при наличии помехи равной мощности.

Также можно использовать метод пространственной аутентификации. Такой метод эффективен против ретрансляционных помех. Если легитимный источник имеет отрицательный угол места, а постановщик помех излучает с земли (положительный угол или многолучевое распространение), используется анализ направления прихода. Современные алгоритмы MUSIC и ESPRIT, дополненные робастными методами оценки числа источников, позволяют разделять два сигнала одной структуры, пришедших с разных азимутальных углов [2].

Кроме того, используются адаптивные стратегии при неизвестной статистике. Традиционная защита предполагает пассивное подавление помех в приемнике. Новым направлением является активное зондирование среды для ухудшения работы постановщика СПП с ЦРЧП.

Еще одним методом борьбы с СПП является применение квазиортогональных зондирующих сигналов с agile-поляризацией. Идея заключается в излучении последовательности импульсов, когерентно обрабатываемых на приеме, но имеющих псевдослучайную поляризацию (переключение с вертикальной на круговую). Типовой ЦРЧП-ретранслятор имеет фиксированную поляризацию приемной антенны. Следовательно,

при смене поляризации зондирования переизлученная помеха будет приходить на приемную позицию с иным соотношением поляризационных компонент, чем полезный сигнал, отраженный от цели (деполяризованный средой).

Математически это описывается через матрицу рассеяния Джонса:

$$E_{rx} = J_{target} \cdot E_{tx}, \quad (3)$$

$$E_{jam} = J_{jam} \cdot E_{tx}, \quad (4)$$

где:

E_{rx} — принимаемое поле цели;

J_{target} — сложная матрица рассеяния цели;

E_{tx} — передаваемое поле;

E_{jam} — принимаемое поле помехи;

J_{jam} — вырожденная (с одной поляризацией) матрица рассеяния антенны постановщика помех.

Сравнение поляризационных векторов позволяет отсеять помеху без анализа формы сигнала.

Пределом развития систем защиты от СПП является создание когнитивного радио, способного к самообучению в реальном времени.

В отличие от классических корреляционных приемников, архитектура на основе глубокого обучения может напрямую аппроксимировать отображение входной смеси в битовый поток или координаты цели, минуя этап явной оценки канала.

В системах связи предлагается замена традиционного помехоустойчивого кодирования и модуляции единой нейросетевой моделью (энкодерно-декодерные сети). В них передатчик (энкодер) превращает сообщение в радиосигнал произвольной формы, а приемник (декодер) обучается извлекать его из смеси с СПП. Обучение происходит в условиях генерируемой состязательной сети, имитирующей поведение самого хитрого постановщика помех.

Однако применение методов глубокого обучения в РЛС и связи ограничено вычислительной сложностью и требованием больших размеченных наборов данных реальных помех, получение которых в условиях конфликта затруднено.

Таким образом, противодействие сигналоподобным помехам в современных условиях перестало быть задачей простого подавления шумов. Это комплексная борьба в пространственно-временной, поляризационной и когнитивной областях. Анализ показал, что наиболее перспективными являются гибридные методы:

1. Пространственная селекция на основе цифровых антенных решеток с быстрой вобуляцией луча.
2. Поляризационная развязка на основе адаптивных сигналов.
3. Интеллектуальная аутентификация источников по тонкой структуре радиосигнала.

Будущее помехозащиты лежит в отказе от фиксированных форматов сигналов и переходе к системам с хаотической динамикой параметров, где форма излучения генерируется нейронной сетью и не может быть предсказана или точно воспроизведена перехватчиком противника.

Литература:

1. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. / А. И. Куприянов, Л. Н. Шустов — 3-е изд. — М.: Вузовская книга, 2017. — 798 с.: ил.
2. Melvin W. L., Scheer J. A. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. — SciTech Publishing, 2022.
3. Gao F., Wang Z., Zheng Z. An Overview of GNSS Spoofing Detection Methods // Sensors. — 2023. — Vol. 21(3). — P. 67–89.
4. O'Shea T. J., Hoydis J. An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. — 2017. — Vol. 3, No. 4. — P. 563–575.
5. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с.

Методы подавления оксидов азота в топках котлов

Ившин Вадим Викторович, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье автор рассматривает основные механизмы образования оксидов азота в топках котлов при сжигании топлива, а также рассматривает наиболее распространенные и применимые на практике способы их подавления с целью снижения загрязняющих выбросов в атмосферу.

Ключевые слова: оксиды азота, топка, горение, рециркуляция, горелки, эмиссия, загрязняющие выбросы.

Вектор развития энергетической промышленности в Российской Федерации направлен на сокращение углеродного следа при сжигании топлива. На основании проекта внедрения Наилучших Доступных Технологий [1] к 2030 году планируется снижение выбросов оксида азота вдвое, что означает ужесточение норм и контроля касательно выброса в атмосферу загрязняющих веществ со стороны производства. Таким образом, развитие технологий, связанных с уменьшением эмиссии оксида азота, имеет крайне приоритетное значение в науке. Однако, наличие крайне устаревшего оборудования на многих генерирующих устройствах страны, делает эту задачу крайне комплексной, сложной, но достижимой во многих сферах, связанных с реализацией.

Цель данной работы — на основе экспериментальных и статистических данных собрать вместе современные взгляды на предмет образования оксидов азота при сжигании топлива, в топках котлов, а также рассмотреть самые действенные мероприятия, технологические и конструктивные пути снижения эмиссии NO_2 в атмосферу.

Прежде чем переходить к рассмотрению конкретных способов уменьшения доли оксида азота в выбросах, необходимо описать причины его генерации в процессе горения топлива. В настоящий момент определяют несколько механизмов образования оксидов азота — это термический, быстрый и топливный. В момент начала горения в корне турбулентного пламени, в зоне температур ниже 1800 К образуются быстрые NO [7]. В то же время с ростом температуры горения прямо пропорционально теплонапряженности топки, времени пребывания в зоне высоких температур происходит выход термических оксидов азота, которые составляют основную долю общего выхода в процессе горения [11]. Наконец последняя разновидность оксидов — топливная, наличие, в составе горючего вещества, кислорода приводит к процессу окис-

ления и связывания его атомами азота в момент сжигания топлива, в области относительно невысоких температур. При дальнейшем контакте с окислителями и восстановителями в газовой среде компоненты переходят как в оксид азота, так и могут восстановиться до молекулярного уровня. В связи с невысокой долей температур в котлах малой и средней мощности, именно топливные оксиды могут иметь доминирующий характер.

Для энергетических котлов ТЭЦ, работающих преимущественно на жидких и газообразных топливах, основную часть выбросов оксидов азота составляют именно термические группы. Самым первым мероприятием по снижению эмиссии можно выделить изменение эксплуатационного режима работы установки, а именно снижение коэффициента избытка воздуха в зоне активного горения, однако такие действия могут приводить к увеличению доли продуктов неполного сгорания (СО, сажи и ПАУ). Однако исследования показали [7], что основная эмиссия термических оксидов задается максимальной температурой газов, а не темпами теплообмена, влияющий лишь косвенно, что означает невозможность достижения допустимых значений у определенных агрегатов за счет режимных изменений, без модернизации топочно-горелочного узла. Неоспоримым плюсом данного способа будет являться его дешевизна и относительная простота в реализации в сравнении с другими мерами.

Технологические методы снижения выбросов оксида азота являются наиболее популярными на производстве среди их многообразия можно выделить следующие: многоступенчатое, нестехиометрическое сжигание топлива, рециркуляция дымовых газов, использование специальных эмульсий и малотоксичных горелок

В случае с двухступенчатым сжиганием топлива топка разделяется на две зоны горения, где в первой происходит

сжигание топлива с недостатком кислорода, а во второй дожигание с подводом, через дутьевые сопла, избытка воздуха. Недостаток воздуха на первом этапе составляет примерно ($\alpha = 0,8-0,95$). В результате чего из-за низкой концентрации кислорода уменьшается образование топливных оксидов азота, также снижение температуры факела уменьшает образование термических соединений. Данный способ показывает наибольшую эффективность только в случае с правильным определением места смешения воздуха второй ступени с газовой смесью. Нарушение этого условия может привести к недостаточному смешению и не довести процесс догорания до конца. Последствиями могут служить образование продуктов неполного сгорания. Правильные расчеты и конструирование модернизации котла может привести к уменьшению выбросов NOx на 50 % [4]. Проводимые исследования для газообразного топлива, результаты показали снижение концентрации вредных выбросов при установке системы нижнего дутья [6]. Комбинация данного метода вместе с рециркуляцией дымовых газов приводит к еще более глубокому подавлению загрязняющих выбросов.

Вышеупомянутый метод рециркуляции дымовых газов подразумевает под собой включение определенной части дымовых газов в процесс сжигания топлива в горелочном устройстве. Основная идея заключается в снижении температуры факела и, как следствие, подавление термических оксидов азота. Проводимые на различных установках, исследования показали, что снижение процесса окисления азота напрямую зависят от места поступления газа рециркуляции. Наилучший эффект показал ввод газов в воздухопроводы перед горелочными устройствами [4]. При условии, что рассчитана и выбрана верная доля рециркуляции газов данный метод является достаточно эффективным и не будет оказывать влияние на КПД котла. Однако стоит отметить, что данный процесс все еще является крайне дорогостоящим.

Не менее эффективным способом снижения выбросов при сжигании жидких топлив является использование водотопливных эмульсий. При добавлении в состав топочного мазута воды позволит снизить его вязкость и улучшить распыление форсунками, что в свою очередь приведет к более равномерному распределению топлива в топке. Использование водомазутной эмульсии позволит снизить на 25 % [15] время подготовки и горение топлива, что приведет к уменьшению высоты факела и подавлению термических и быстрых оксидов азота. Внедрение всего лишь 10 % воды в топливный мазут понизит теплоту сго-

рания не более чем на 1 %, но в то же время уменьшит образование NOx в два раза [16]. Стоит отметить, что данный способ применим только для котлов, сжигающих жидкое топливо, для которых возможно компенсировать падение КПД, так как в данном методе избежать его нельзя.

Самым доступным с точки зрения бюджета является монтаж более совершенных горелочных устройств. Исследования малотоксичных горелок показывают, что главную роль играют разработки подавления температурных и топливных процессов образования оксидов азота в факеле. Поэтому в современных горелках целенаправленно формируют протяженную область смешения топлива и воздуха с пониженной температурой факела. Исследования показали, что разделение воздуха на центральный и периферийный поток, с оптимальным соотношением расходов, позволит достичь удлинение пути диффузионного смешения, тем самым, сглаживания температурное поле, что приведет к снижению образования термических оксидов азота [9]. Низкоэмиссионные горелочные устройства с двухканальной конструкции по воздуху с осевыми завихрителями в центральном и периферийном каналах формируют зоны с развитым внутренним перемешиванием, с отсутствием областей с высокими температурами [20].

В заключении можно сказать о том, что рассмотренные технологические решения, практические и теоретические данные отражают общую причину образования оксидов азота при сжигании топлива в топках котлов, которая заключается в результате сложного взаимодействия механизмов, чувствительного к температурным и временным параметрам, коэффициенту избытка воздуха, геометрических параметров топки. Каждый из рассмотренных методов имеет под собой ряд недостатков, который надо учитывать. Зарубежный и отечественный опыт показывает, что технологические меры должны рассматриваться как первоочередные по отношению к установке систем доочистки дымовых газов, которые целесообразны лишь после исчерпания конструктивных и режимных возможностей предотвращения образования оксидов азота. Дальнейшее развитие исследований в данной области должно быть связано с детализированным численным моделированием тепломассообмена в факеле, экспериментальной проверкой на действующих, эксплуатирующихся энергетических установках, а также разработкой адаптивных систем регулирования горения, способных в реальном времени поддерживать оптимальные условия с точки зрения минимизации выброса загрязняющих веществ.

Литература:

1. Об основных направлениях политики Российской Федерации в области климата и о стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р.
2. Штегман А. В., Рыжий И. А., Сосин Д. В., Соколова А. В., Трушков И. И. Опыт применения малоэмиссионных горелок на энергетическом котле угольной ТЭЦ для снижения выбросов оксидов азота // Теплоэнергетика. 2025. № 6. С. 92–104.

3. Росляков П. В., Егорова Л. Е., Нонкин И. Л. Технологические мероприятия по снижению вредных выбросов ТЭС в атмосферу. М.: Издательство МЭИ, 2001.
4. Жуйков А. В. Снижение оксидов азота в топках котлов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2011. Т. 4, № 6. С. 620–628.
1. Тринченко А. А. Снижение выбросов оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива // Научнотехнические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Наука и образование. 2011. № 2. С. 52–59.
2. Технологические методы снижения выбросов оксидов азота при сжигании органического топлива в энергетических и водогрейных котлах (информация ВТИ) // Промышленная энергетика. 2011. № 4. С. 34–40.
3. Баубеков К. Т., Беркетов С. С. Об актуальности снижения образования оксидов азота в топках котлов // Вестник Карагандинского государственного технического университета. 2008. № 3. С. 57–61.
4. Таймаров М. А., Ахметова Р. В., Сунгатуллин Р. Г., Лавирко Е. С. Снижение вредных выбросов в атмосферу оксидов азота котлами ТЭС // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1. С. 180–186.
5. Соболев В. М. Современные технологические решения при разработке топочногорелочных устройств // Новости теплоснабжения. 2010. № 10 (146). С. 23–25.
6. Снижение выбросов оксидов азота путем рециркуляции и увлажнения части дымовых газов // С. О. К. Сантехника, отопление, кондиционирование. 2006. № 3. С. 60–63.
7. Шевердяев О. Н., Гвоздев В. М., Пахомов А. В., Майоршина Л. И. Методы снижения эмиссии оксидов азота на пылеугольных котлах // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 2. С. 24–28.
8. Прошкина Д. Н., Бахтина И. А. Эффективное сжигание топлива как способ снижения выбросов на ТЭЦ // Эффективное сжигание топлива на теплоэлектроцентралях: материалы научной конференции. 2015. С. 45–49.
9. Иваницкий М. С. Разработка практических рекомендаций выбора сечения газохода для непрерывного контроля и учета выбросов вредных (загрязняющих) веществ ТЭС в атмосферу // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 3. С. 54–59.
10. Пономарёва Н. В. Системы сжигания и очистки газовых выбросов промышленных предприятий и ТЭС // Промышленная экология. 2014. № 2. С. 35–42.
11. Булгаков А., Булгаков Б. Подготовка топливных смесей // ММ. Деньги и технологии. Журнал для профессионалов топливно-энергетического комплекса. 2009. № 1–2. С. 36–39.
12. Адамов В. А. Сжигание мазута в топках котлов. Л.: Недра, Ленингр. отд-ние, 1989. 304 с.
13. Росляков П. В. Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов по направлению 140500 «Энергомашиностроение». М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 336 с.
14. Ганеев А. Т., Мингалева Г. Р. Экологические показатели работы Уфимской ТЭЦ2 при сжигании мазута. С. 45–48.
15. Котлер В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 144 с
16. Верещетин В. А. Совершенствование низкоэмиссионных газогорелочных устройств котлов ТЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. Москва, 2018. 131 с.

Исследование современных направлений применения эффекта Ранка — Хилша

Касымов Расул Русланович, студент магистратуры
Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева (Казахстан)

В статье разбираются современные сферы применения эффекта Ранка — Хилша. Речь идёт о промышленности, холодильных системах, энергетике и теплотехнических установках. Отдельно рассматриваются исследования, посвящённые вихревым трубкам: как их используют для охлаждения, нагрева и усиления теплообмена. Большой акцент сделан на математическом моделировании вихревых процессов и на направлениях развития вихревой техники.

Ключевые слова: эффект Ранка–Хилша, вихревая трубка, теплообмен, охлаждение, энергетика, CFD-моделирование, MATLAB.

Введение

Сам по себе эффект Ранка — Хилша относится к числу самых интересных, но при этом и самых сложных явлений

в теплогазодинамике. Суть в том, что поток сжатого газа внутри вихревой трубки разделяется на две части: одна выходит более холодной, другая становится горячей. При этом устройство выглядит довольно просто, а вот физика процессов

внутри вихря до сих пор изучена не полностью. Поэтому эффект Ранка — Хилша остаётся темой живого научного поиска.

В последние десятилетия внимание к вихревым трубкам заметно выросло. Причина понятна. Развиваются энергоэффективные технологии, ужесточаются требования к экологической безопасности, а ещё всё чаще нужны компактные системы охлаждения без применения хладагентов. Исследования показывают, что вихревые трубки способны работать в достаточно жёстких условиях, там, где классические холодильные машины применять сложно.

Сегодня эффект Ранка — Хилша изучают в самых разных сферах техники. Его применяют для локального охлаждения, в холодильных установках, в энергетике, в авиационных системах, в металлургии и для стабилизации температурного режима оборудования. Существенную роль в развитии направления сыграли публикации в журналах *Applied Thermal Engineering*, *Energy*, *International Journal of Refrigeration* и *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

Применение вихревых трубок в промышленном охлаждении

Одна из самых распространённых областей использования вихревых трубок — это промышленное охлаждение. Их применяют в машиностроении, при металлообработке и в автоматизированных производственных линиях. Холодный поток, который формируется в результате вихревого разделения, используют для охлаждения режущего инструмента, сварочных зон, пресс-форм и обрабатываемых деталей.

Важное преимущество такого подхода в том, что во многих случаях можно обойтись без жидкостного охлаждения. Это упрощает рабочий процесс, снижает риск загрязнений и уменьшает затраты на обслуживание. Особенно ценны вихревые системы там, где высокие температуры сочетаются с запылённостью.

Эффективность вихревого охлаждения, по данным современных исследований, сильно зависит от давления сжатого воздуха, от того, как устроены сопла, и от геометрии вихревой камеры. Много работ посвящено оптимизации формы сопловых узлов и анализу турбулентности внутри трубки. Например, в исследованиях *Applied Thermal Engineering* отмечают, что изменение конструкции соплового аппарата способно заметно повысить эффективность температурного разделения [1].

Использование эффекта Ранка — Хилша в холодильных системах

В последние годы всё активнее развиваются вихревые трубки, и всё больше работ посвящают их применению в холодильной технике. Исследователи рассматривают такие трубки как возможный элемент холодильного цикла. Главная цель в этих исследованиях — это повысить энергоэффективность и снизить зависимость от традиционных хладагентов.

Отдельный интерес вызывают решения на углекислом газе. В системах с CO₂ вихревая трубка может помочь

уменьшить потери энергии и улучшить общий коэффициент полезного действия установки. В публикациях также подчёркивается, что эффект Ранка — Хилша позволяет более эффективно распределять температуры внутри холодильного цикла.

Есть и практические области, где вихревые трубки используют для точечного охлаждения. Их применяют для электронных узлов, медицинского оборудования, измерительных приборов. Поскольку в таких устройствах нет движущихся частей, они получаются надёжными и хорошо переносят вибрации [2].

Применение в энергетике и теплообменных системах

В энергетике эффект Ранка — Хилша рассматривают как перспективный способ локально охлаждать и перераспределять тепловую энергию. Вихревые трубки используют для охлаждения датчиков, элементов автоматики и оборудования, которое работает при повышенных температурах.

Также активно изучают вихревые трубки в теплообменных системах. Закрученный поток способен усиливать теплообмен и улучшать распределение температур по объёму. Для энергетических установок это особенно важно, ведь эффективность теплообмена напрямую влияет и на расход энергии, и на устойчивость работы оборудования.

В ряде исследований делают акцент не только на охлаждении, но и на использовании горячей части потока. Такой подход позволяет задействовать обе составляющие и повысить общую энергетическую отдачу системы [3].

Применение в энергетике и теплообменных системах

С развитием вычислительных методов и программных комплексов изучать эффект Ранка — Хилша стало проще и быстрее. Сейчас для анализа вихревых потоков часто применяют CFD-моделирование. Наиболее распространены инструменты вроде MATLAB, Simulink и ANSYS Fluent. Численные модели позволяют проследить, как внутри трубки распределяются температура, давление и скорость потока. Отдельное внимание уделяют турбулентности, потому что именно она во многом определяет характер температурного разделения.

В современных расчётах используют уравнения Навье — Стокса и разные турбулентные модели, например, $k-\epsilon$ и $k-\omega$ SST. CFD-подход помогает сократить число дорогих экспериментов и ускорить проектирование [4].

Современные тенденции и перспективы развития

Сегодня исследования эффекта Ранка-Хилша нацелены на то, чтобы повысить эффективность вихревых трубок и расширить сферы их применения. Большой фокус делают на оптимизации геометрии сопел, анализе турбулентных структур и подборе новых материалов.

Отдельно выделяют идею гибридных систем охлаждения, где вихревые трубки объединяют с традицион-

ными теплотехническими установками. Параллельно изучают, как можно использовать методы искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования параметров температурного разделения.

Интерес к вихревым системам есть и в авиации, и в космической технике. Там особенно ценят компактность, надёжность и отсутствие движущихся элементов. В исследованиях рассматривают работу таких систем в условиях вакуума и при переменных температурных режимах.

В целом современные публикации сходятся в одном: потенциал эффекта Ранка — Хилша для дальнейшего внедрения в промышленность действительно высокий.

Заключение

Проведённые исследования показывают, что эффект Ранка — Хилша сегодня считают одним из перспективных

направлений для развития теплотехники и холодильных систем. Вихревые трубки уже используют в промышленном охлаждении, энергетике, холодильных установках и задачах термостабилизации.

Особенно ценят их простую конструкцию и то, что в таких устройствах нет движущихся частей. Благодаря этому они работают надёжно и хорошо переносят сложные условия эксплуатации. Кроме того, современные подходы к математическому моделированию помогают точнее разбирать процесс разделения температур и подбирать оптимальные параметры работы вихревых систем.

По обзорам научных публикаций можно ожидать, что дальше вихревые технологии будут развивать прежде всего в сторону повышения энергетической эффективности. Также будут совершенствовать методы CFD моделирования и искать новые области применения эффекта Ранка — Хилша в промышленности.

Литература:

1. A theoretical model for the effective thermal conductivity of silica aerogel composites / Dai Yan-Jun, Tang Yu-Qing, Fang Wen-Zhen [и др.]. — Текст: непосредственный // Applied Thermal Engineering. — 5 January 2018. — № 128. — С. 1634–1645.
2. Yefeng, Liu Analysis of a CO2 Transcritical Refrigeration Cycle with a Vortex Tube Expansion / Liu Yefeng, Sun Ying, Tang Danping. — Текст: непосредственный // Sustainability. — 2019. — № 2021. — С. 11.
3. Mostafa, El-Shafie Journal of Power and Energy Engineering / El-Shafie Mostafa, Kambara Shinji, Hayakawa Yukio. — Текст: непосредственный — January 2019. — № 1. — С. 7.
4. Wetting transition in laser-fabricated hierarchical surface structures and its impact on condensation heat transfer characteristics / Venkata Krishnan D, Udaya Kumar G, S. Suresh [и др.]. — Текст: непосредственный // International Journal of Heat and Mass Transfer. — September 2019. — № 140. — С. 886–896.

Predictive maintenance in heavy industry: how machine learning reduces downtime and cost

Lavrov Igor Andreevich, head of Digital Transformation Projects for metallurgical production
StankProm LLC (Moscow)

The gap between laboratory model performance and production deployment outcomes remains the central unresolved problem in predictive maintenance research. This article argues that governance architecture, the authority level at which a predictive maintenance system operates, the interface through which operators interpret model output, and the feedback structure through which operator corrections re-enter the model as training data, is the binding constraint on deployment performance, not classifier accuracy. Drawing on systematic reviews by Carvalho et al. (2019), Zonta et al. (2020), Achouch et al. (2022), Serradilla et al. (2022), and a steel-industry survey by Jakubowski et al. (2024), the article traces the evolution of ML-based predictive maintenance from SVM multi-classifier frameworks through deep CNN-LSTM architectures to transfer learning roadmaps. Deployment evidence from an integrated U. S. steel plant, where a sensor-and-alert infrastructure prevented over 1,000 failures and generated \$20 million in verified savings without a methodologically novel model, directly contradicts the algorithm-first assumption. The open empirical question is whether the benchmark-to-production accuracy gap is closable through governance-enabled feedback mechanisms or reflects sensor-environment constraints that structured feedback cannot overcome.

Keywords: predictive maintenance, machine learning, deep learning, shared autonomy, governance architecture, transfer learning, heavy industry, human-machine collaboration.

Introduction

Unplanned equipment failure is the defining cost driver in asset-intensive heavy industry, yet its financial scale is rou-

tinely underestimated until deployment-phase data forces a revision. A single integrated steel plant deploying an AI-based early warning system documented the prevention of more than 1,000 potential equipment failures in a pilot phase, gen-

erating verified savings of approximately \$20 million and projecting an additional \$47.5 million in avoided losses over five years [10]. That figure, while plant-specific, is consistent with the broader industry trajectory: the National Institute of Standards and Technology has documented cost reductions of up to 56 % on maintenance expenditure when plants transition from schedule-driven to condition-based regimes, and sector surveys report a 15–25 % improvement in equipment utilization with predictive approaches in place [1]. The gap between what traditional maintenance recovers and what predictive systems recover is the difference between reactive cost absorption and systematic failure prevention across rolling mills, blast furnaces, conveyors, and drive motors that collectively determine whether a continuous-process facility runs or stands idle.

The primary obstacle to ML deployment in heavy-industry maintenance is the absence of the organizational conditions under which any algorithm produces operational value. Condition-based maintenance research established the vocabulary for this transition over two decades ago [4], and prognostics-and-health-management frameworks extended it to rotating machinery with a structured five-stage design methodology [5]. Both paradigms degrade in performance precisely where heavy industry is most demanding: environments characterized by variable material properties, label scarcity, sensor noise under thermal and electromagnetic interference, and legacy control architectures that cannot be retrofitted with continuous data streams at low cost. The systematic review by Zonta et al. [13], covering 38 studies published through mid-2020, confirmed that data quality, heterogeneous equipment, and the absence of standardized fault labeling were the binding constraints on ML deployment in Industry 4.0 manufacturing contexts. Carvalho et al. [2], reviewing 30 papers, found that hybrid ML methods combining feature-engineering pipelines with ensemble classifiers outperformed single-algorithm approaches but generalized inconsistently across operating regimes, a failure mode that intensifies in blast furnace and rolling mill environments where load profiles shift seasonally and with material grade. At the model architecture level, the trajectory from classical SVM-based multi-classifier designs [11] to deep CNN–LSTM hybrids [12] improved benchmark accuracy substantially, while introducing a failure mode that benchmark metrics cannot detect: a model trained on controlled, fully-labelled datasets that produces high laboratory scores and fails on the noisy, imbalanced, partially-labelled sensor records of an actual production deployment.

Literature Review

Treating classifier selection as the central engineering problem in predictive maintenance is the foundational assumption that subsequent research inherited without examining. Susto et al. [11] introduced a multiple-classifier framework for semiconductor manufacturing in which Support Vector Machines, trained on process and logistic variables capturing the degradation footprint, predicted fault conditions at the part-level without direct measurement of component

wear, establishing that data-driven PdM could generate predictions without sensor access to the degrading component itself, and simultaneously framing all subsequent research questions around which classifier to select rather than what organizational conditions enable any classifier to generate value. Jardine et al. [4] had earlier structured condition-based maintenance around three constitutive stages (data acquisition, signal processing, and decision algorithms) a taxonomy that positioned the field as a signal-processing and modeling discipline rather than a socio-technical deployment challenge. Lee et al. [5] extended this logic into the PHM framework with a five-stage design methodology for rotary machinery that assumed sensor infrastructure was already in place, failure labels were available, and engineers had computational resources to implement the recommended algorithms: three assumptions that eliminate precisely the conditions under which heavy-industry PdM actually fails.

When deep learning entered the field, it raised the performance ceiling without questioning what was holding deployment back. CNN, RNN, autoencoder, and deep belief network architectures achieve lower remaining-useful-life estimation error and higher fault classification accuracy than SVM-based and shallow ensemble methods on the CWRU bearing dataset, the PRONOSTIA bearing dataset, and the NASA turbofan degradation data, benchmarks that Zhao et al. [12] surveyed comprehensively and that Lei et al. [6] used as the empirical spine of a developmental roadmap from classical ML through deep learning to transfer learning. The roadmap argues that transfer learning reduces dependence on large labeled datasets in the target domain by allowing diagnosis knowledge acquired in one task to be applied to related tasks. What the roadmap does not quantify is the distance between the benchmark domains and the target domains it proposes to bridge: label completeness on the CWRU and PRONOSTIA datasets approaches 100 %, class balance between fault and non-fault observations is controlled by dataset construction, and sensor drift, electromagnetic interference, and maintenance-log gaps are absent by design. In a blast furnace or continuous hot-strip mill, all three of these conditions are reversed. Transfer learning is a technically sound response to labeled-data scarcity, but the organizational infrastructure that generates labeled data in the target domain, specifically, the structure through which operator judgments about model outputs become recorded training signal.

Four systematic reviews — Carvalho et al. [2], Zonta et al. [13], Achouch et al. [1], and Serradilla et al. [8] — aggregate several hundred studies and document the state of ML-based PdM more comprehensively than any primary research program, yet none can answer whether reported accuracy metrics predict operational outcomes in production environments, because production environments are not in their evidence base. Carvalho et al. [2] found that hybrid methods combining feature engineering with ensemble classifiers produced more consistent accuracy and F1 scores across application domains than standalone SVM or decision-tree classifiers evaluated without feature construction; the review cannot establish whether that consistency advantage survives sensor drift, load-profile variability, and the

class imbalance of continuous-production fault records. Zonta et al. [13] catalogued data quality, equipment heterogeneity, and absent fault labeling as the primary deployment obstacles, correctly identifying the constraints but positioning them as inputs to better algorithm design, a framing that directs engineering effort toward model sophistication rather than toward the workflow integration and authority structures that production failures actually implicate. Achouch et al. [1] named financial and organizational barriers alongside technical ones (budget constraints, data source fragmentation, repair-planning integration difficulty) but treated all three categories as parallel and separable, which permits the inference that solving technical barriers independently of organizational ones constitutes deployment progress. Serradilla et al. [8] achieved the most architecturally specific diagnosis: comparing CNN, LSTM, autoencoder, and self-organizing map designs across industrial use cases, they identified data variability handling, concept-drift adaptability, and ensemble design as the properties distinguishing deployable from laboratory-only systems. The prescription that follows from that diagnosis keeps the solution entirely within the model and leaves the question of what organizational conditions allow the model's outputs to reach and be acted upon by a maintenance engineer entirely outside scope.

Surveying 219 steel-industry articles, Jakubowski et al. [3] found that research concentrates disproportionately on blast furnaces and hot rolling, that deep learning has become the dominant methodology, and that the central unresolved problem is not algorithmic performance on controlled data but implementation in production environments, integration into maintenance plans, and reproducibility across deployments. The reproducibility failure Jakubowski et al. identify is the same structural gap that the U. S. steel deployment Shargaev [10] documents resolves from the other side: the \$20 million in pilot-phase savings from preventing over 1,000 failures was not generated by a model with higher classification accuracy than existing approaches but by a deployment architecture in which sensor-based alerts were designed for direct interpretability by maintenance engineers and routed into the existing maintenance workflow, making organizational integration the variable that converted model output into maintenance action. The 219 studies Jakubowski et al. surveyed optimized the model; the deployment Shargaev [10] documents optimized the pathway from model output to engineer action, and the pathway produced the larger and more measurable outcome.

At the boundary where algorithm-first research runs out of explanatory power, the mechanism by which AI predictions become maintenance actions becomes the central design question, the interface through which an operator interprets it, the authority level at which the system acts on it, and the structure through which operator corrections re-enter the model as training data. Ran et al. [7] survey PdM system architectures across a wide field and recommend deep reinforcement learning for maintenance decision support in complex dynamic environments, treating the decision support interface and the authority structure around it as implementation details rather than as design variables that determine whether

the system is used at all. The authority structure is not an implementation detail: a conditional-autonomy assignment, in which the system acts unless its uncertainty exceeds a defined threshold, at which point the operator handles the exception, produces fundamentally different operational outcomes than a shared-control assignment requiring operator confirmation for every alert, even when the underlying model is identical. A four-level shared-autonomy framework specifying assisted action, shared control, conditional autonomy, and full task autonomy with oversight, with authority-level assignment determined by the consequence of error, the reversibility of the action, and the gap between operator domain knowledge and model uncertainty at the decision point, provides the vocabulary the architecture-comparison literature lacks for diagnosing why identically-specified models produce different operational outcomes across deployment environments [9]. The four levels correspond to empirically distinct decision structures, from quality inspection tasks where the operator retains final authority to stable repetitive operations where the AI acts and the human audits, and the assignment criteria make the authority-level decision tractable rather than arbitrary.

Discussion

Two explanatory models compete to account for why AI-based PdM underperforms relative to laboratory benchmarks, and the choice between them determines where engineering effort should concentrate. The algorithmic model locates the problem in model design: insufficient labeled data, poor generalization across operating regimes, and the gap between benchmark and industrial sensor characteristics. The governance model locates the problem in the structures that determine who acts on model output, under what conditions, with what authority, and through what feedback mechanism.

The multiple-classifier framework Susto et al. [11] established carried an embedded causal claim: health factors (quantitative indicators of system status derived from process variables) drive maintenance scheduling decisions, and better classifiers generate more accurate health factors, which produce better maintenance outcomes. More accurate prediction leads straightforwardly to better maintenance scheduling. The steel deployment Shargaev [10] documents contradicts the mechanism, not merely the result. A sensor-and-alert infrastructure that prevented over 1,000 failures and generated \$20 million in verified savings operated in an environment harder for ML than the semiconductor context Susto et al. studied (higher noise, more variable sensor quality, fewer labeled fault records) yet produced larger and more measurable operational gains. The difference was not classification accuracy; the deployment communicated predictions through interpretable alerts designed for maintenance engineers and integrated them into an existing maintenance workflow, making organizational integration the active variable. Classifier design improvements have diminishing returns once predictions are accurate enough to trigger appropriate responses, and that sufficiency threshold is considerably lower than benchmark per-

formance metrics suggest, which means that most of the accuracy investment the algorithmic literature recommends is being spent above the threshold where it produces operational returns.

CNN-LSTM architectures achieving 96.1 % accuracy and F1-scores above 0.95 on industrial machine datasets under controlled conditions are real results, and Serradilla et al.'s [8] architectural guidance, that simultaneous modeling of spatial and temporal structure outperforms single-architecture designs on time-series sensor data when training sets are sufficiently large and balanced, is valid within the conditions it states. Jakubowski et al. [3] found that most steel-industry research relies on laboratory experiments or historical data with controlled quality rather than on the continuously-drifting, partially-labeled sensor records that blast furnaces and hot rolling mills generate. The accuracy gap between controlled-experiment and production-deployment performance is the central empirical quantity the field has not measured, because measuring it requires access to instrumented industrial deployments that most research groups cannot obtain. Serradilla et al. prescribe training for data variability as the architectural solution to deployability, implying that a sufficiently robust model can operate without structured human involvement at uncertainty boundaries, that model resilience substitutes for governance design. The deployment evidence does not support this substitution: a model that handles concept drift gracefully still requires an authority structure that routes its outputs to engineers, at the right decision threshold, with the right interface, before it generates any operational outcome at all.

Conditional autonomy, the authority level at which the system acts unless its uncertainty exceeds a defined threshold, reverting to operator control at the exception boundary, is the assignment the three-criteria framework produces for predictive maintenance, because PdM errors are consequential, maintenance actions are partially reversible, and operator domain knowledge exceeds model confidence in the high-uncertainty cases that matter most [9]. A deployment configured instead at shared control, requiring operator confirmation for every alert regardless of model confidence, degrades into alert fatigue: operators habituate to confirming alerts without evaluation, and the effective sensitivity of the system falls toward zero regardless of the model's classification accuracy. A deployment configured at full autonomy, acting on every alert without review, produces over-trust failures when model confidence is high but the operating context has shifted outside the training distribution, a condition that load-profile changes, material grade variation, and seasonal thermal cycles produce routinely in heavy industry. The authority-level specification is therefore not a configuration choice made after deployment; it is a precondition for whether the deployment generates value or generates noise. The feedback loop this structure enables is what Lei et al.'s [6] transfer-learning roadmap requires but does not specify: operator interventions at conditional-autonomy exception boundaries produce labeled target-domain data, the operator's resolution of a case the model flagged as uncertain is a supervised datapoint recording a production-environment

fault pattern the training set did not contain. Without the conditional-autonomy structure, no systematic mechanism generates this data; the transfer-learning model remains dependent on the benchmark datasets whose distance from industrial sensor records the roadmap identifies as the central problem. The technical roadmap and the governance framework address the same constraint from different directions, and the technical solution is inoperable without the organizational one.

Multidisciplinary approaches to PdM adoption are operationally underspecified in the Industry 4.0 and Industry 5.0 literature. Achouch et al. [1] identify financial and organizational barriers alongside technical ones but organize them as parallel categories, implying that each can be addressed on its own track. Zonta et al. [13] observe that computer science is increasingly displacing engineering as the dominant expertise in industrial maintenance and call for multidisciplinary integration without specifying what integration requires at the level of authority structures, interface design, and workforce skill architecture. Workforce skill architecture and interface transparency are not additions made after authority levels are assigned, they are preconditions for making the assignment at all, because conditional autonomy requires an operator capable of handling exceptions and an interface that communicates model uncertainty in a form the operator can act on. The authority level, the interface that makes model uncertainty legible to the operator, the feedback structure that records operator resolutions as training data, and the workforce skill profile that supports exception handling must be determined together, not sequentially, as Shargaev [9] specifies in treating these as co-designed elements of the governance framework rather than as a stack of additions to a technical core. Whether this specific framework is the right operationalization is open to empirical test; that some operationalization of governance architecture is a precondition for deployment-level performance is, given the accumulated evidence, no longer seriously in doubt.

Conclusion

Governance architecture is the binding constraint on PdM deployment performance, and the field's investment in algorithmic sophistication has been concentrated above the accuracy threshold at which governance determines outcomes. This was not a recoverable conclusion from Jardine et al. (2006), Carvalho et al. [2], or Zonta et al. [13] because it requires production-deployment data of the kind that Shargaev [10] documents and Jakubowski et al. [3] identify as structurally absent from the published research base, data that records the rate at which model outputs become maintenance actions under operational ones. The counter-intuitive implication is directional: the next marginal improvement in heavy-industry PdM outcomes is more likely to come from specifying the authority level at which a model of current accuracy operates than from improving that accuracy further.

What the evidence cannot yet resolve is whether the benchmark-to-production accuracy gap is closable through the feedback mechanisms that governance design enables, or whether it

reflects sensor-environment constraints that no feedback loop can overcome. If the gap is closable, the conditional-autonomy structure generates a measurable convergence trajectory: target-domain labels accumulate at exception boundaries, transfer-learning models retrain on production-environment fault patterns, and deployment accuracy approaches benchmark performance over a horizon that longitudinal instrumentation can track. If the gap is not closable, if blast-furnace and hot-

rolling sensor records are sufficiently different from any available training domain that structured feedback cannot produce adequate labeled coverage, then benchmark accuracy is the wrong evaluation standard for heavy-industry PdM entirely, and the field requires performance criteria defined against the baseline of the maintenance regime the AI system replaces rather than against the controlled-dataset ceiling it approaches in the laboratory.

References:

1. Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah Karganroudi, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., & Adda, M. (2022). On predictive maintenance in Industry 4.0: Overview, models, and challenges. *Applied Sciences*, 12(16), Article 8081. <https://doi.org/10.3390/app12168081>
2. Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. da P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, Article 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
3. Jakubowski, J., Wojak-Strzelecka, N., Ribeiro, R. P., Pashami, S., Bobek, S., Gama, J., & Nalepa, G. J. (2024). Artificial intelligence approaches for predictive maintenance in the steel industry: A survey. *arXiv*.
4. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
5. Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems: Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2), 314–334. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.004>
6. Lei, Y., Yang, B., Jiang, X., Jia, F., Li, N., & Nandi, A. K. (2020). Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, Article 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587>
7. Ran, Y., Zhou, X., Wen, Y., & Zhu, T. (2019). A survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches. *arXiv*.
8. Serradilla, O., Zugasti, E., Rodriguez, J., & Zurutuza, U. (2022). Deep learning models for predictive maintenance: A survey, comparison, challenges and prospects. *Applied Intelligence*, 52(10), 10934–10964. <https://doi.org/10.1007/s10489-021-03004-y>
9. Shargaev, V. (2025). Future of manufacturing: Human and machine collaboration. Lambert.
10. Shargaev, V. G. (2026). AI-based predictive maintenance in steel industry. In *Proceedings of the LXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation»*. Primedia E-launch LLC.
11. Susto, G. A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S., & Beghi, A. (2015). Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(3), 812–820. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2349359>
12. Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., Mao, K., Wang, P., & Gao, R. X. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>
13. Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, Article 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>

Исследование разрушения горных пород и рационального расстояния между двумя сосредоточенными зарядами в масштабной бетонной модели

Ле Хонг Хай, преподаватель

Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куи Дона (г. Ханой, Вьетнам)

На основе метода построения поля скоростей согласно гидродинамической теории взрыва для одиночного сосредоточенного заряда в данной работе проведены построение и анализ поля скоростей и условий разрушения частиц горной породы при взрыве двух близко расположенных сосредоточенных зарядов в полубесконечной среде. Исследование направ-

лено на изучение распространения взрывных волн, процесса взаимодействия полей напряжений и влияния расстояния между двумя зарядами на эффективность разрушения горных пород. С использованием программного комплекса ANSYS AUTODYN выполнено моделирование процесса взрыва и проведено сравнение эффективности взрыва при изменении расстояния между зарядами. Предложены меры по повышению эффективности буровзрывных работ.

Ключевые слова: сосредоточенный заряд, расстояние между зарядами, радиус разрушения, выбросная воронка взрыва.

1. Введение

При выполнении земляных работ и разработке горных пород методом буровзрывных работ расстояние между зарядами имеет важное значение для эффективности разрушения массива, формы выемки и удобства последующей погрузки после взрыва. Если расстояние между зарядами слишком мало, происходит чрезмерная концентрация энергии взрыва, что приводит к разрушению сверх проектных параметров и увеличению расхода взрывчатых веществ. Напротив, при слишком большом расстоянии образуются подошвенные выступы или неразрушенные зоны между взрывными воронками.

В настоящее время многие исследования посвящены механизму разрушения горных пород одиночным зарядом в полубесконечной среде. Однако теоретические исследования и численное моделирование взаимодействия двух близко расположенных сосредоточенных зарядов пока ограничены, особенно для случая формирования выбросной воронки в среде со свободной поверхностью.

Поэтому исследование закономерностей взаимодействия полей напряжений и определение рационального расстояния между зарядами имеет важное научное и практическое значение, способствуя повышению эффективности взрывных работ, снижению стоимости строительства и обеспечению требуемых размеров выемки согласно проекту.

2. Теоретические основы

2.1. Разрушающее действие одиночного заряда, расположенного вблизи свободной поверхности

Согласно гидродинамической теории, при взрыве сосредоточенного заряда в полубесконечной среде воздействие взрыва в каждой точке рассматривается как действие реального заряда C^+ и мнимого заряда C^- , расположенного симметрично относительно свободной поверхности. Реальный заряд вызывает движение частиц среды от центра взрыва, тогда как мнимый заряд оказывает противоположное действие — притягивает частицы к центру взрыва. Таким образом, каждая частица среды получает два вектора скорости. Результирующий вектор определяется суммированием этих скоростей, и если его величина превышает критическую скорость, среда в данной точке разрушается [1, 2, 4, 6].

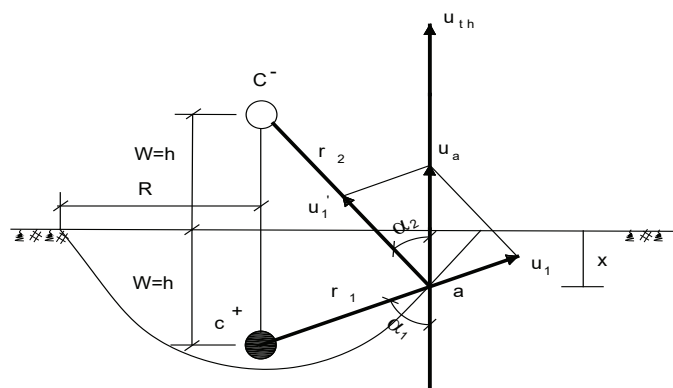


Рис. 1. Схема взаимодействия реального и мнимого заряда в полубесконечной среде

Рассмотрим произвольную точку А, расположенную на границе взрывной воронки на глубине x относительно свободной поверхности.

Составляющая скорости в точке А, вызванная реальным зарядом C^+ :

$$u_1 = u_0 \left(\frac{r_0}{R_1} \right)^2 \quad (1)$$

Составляющая скорости, вызванная мнимым зарядом C^- :

$$u'_1 = u_0 \left(\frac{r_0}{R_2} \right)^2 \quad (2)$$

Суммарная скорость от реального и мнимого зарядов:

$$|\vec{u}_A| = |\vec{u}_1| + |\vec{u}_1'| \quad (3)$$

$$\Rightarrow u_A = u_0 \cdot \left(\frac{r_0}{R_1}\right)^2 \cos \alpha_1 + u_0 \cdot \left(\frac{r_0}{R_2}\right)^2 \cos \alpha_2$$

$$\Rightarrow u_A = u_0 \cdot r_0^2 \cdot \left[\frac{w-x}{R_1^3} + \frac{w+x}{R_2^3} \right]$$

$$\Rightarrow u_A = u_0 \cdot r_0^2 \cdot \left[\frac{w-x}{\left[\left(\frac{a}{2}\right)^2 + (w-x)^2\right]^{3/2}} + \frac{w+x}{\left[\left(\frac{a}{2}\right)^2 + (w+x)^2\right]^{3/2}} \right] \quad (4)$$

где:

u_0 — начальная скорость среды на границе заряда;

r_0 — радиус заряда;

$R_1; R_2$ — расстояния от исследуемой точки до центра реального и мнимого зарядов соответственно.

Частица среды в точке А разрушается при условии достижения критической скорости: $u_A = u_{th}$ (5)

2.2. Построение и анализ модели действия двух близко расположенных сосредоточенных зарядов

Предположим, что два сферических заряда C_1 и C_2 взрываются в полубесконечной горной среде. Заряды размещены вблизи свободной поверхности с целью формирования выбросной воронки. Согласно гидродинамической теории, частицы среды испытывают воздействие скоростей от обоих зарядов C_1 и C_2 , а также от их мнимых зарядов (C^-), симметричных относительно свободной поверхности.

Рассмотрим точку А, расположенную на плоскости между двумя зарядами на глубине x . Разрушение в точке А происходит тогда, когда результирующая скорость достигает критического значения.

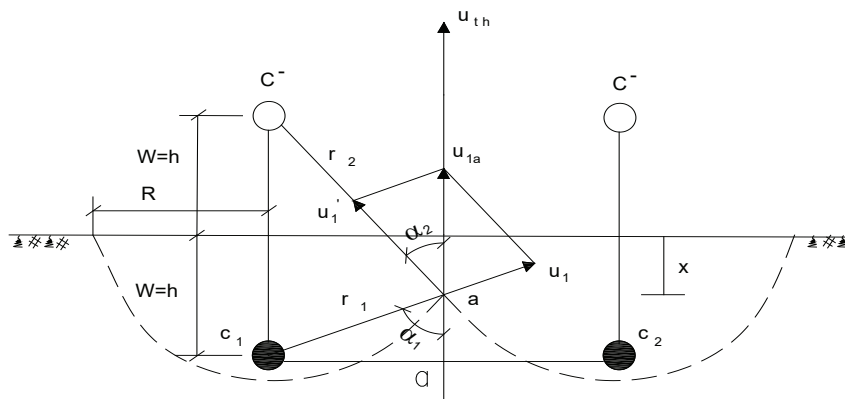


Рис. 2а. Векторы скорости заряда C_1 и мнимого заряда (C^-)

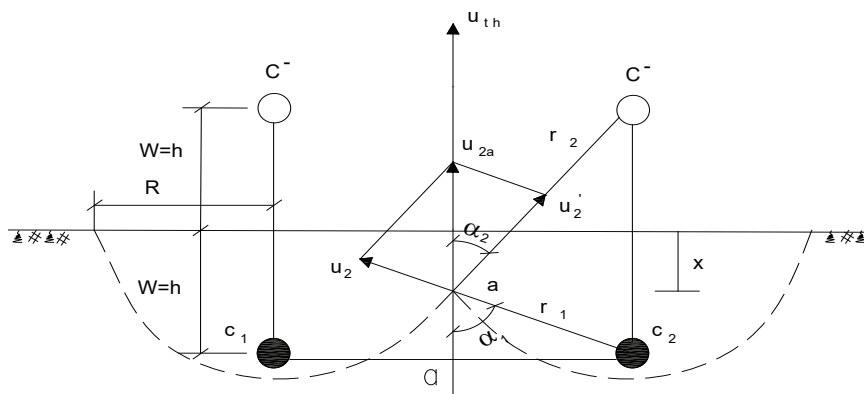


Рис. 2б. Векторы скорости заряда C_2 и мнимого заряда (C^-)

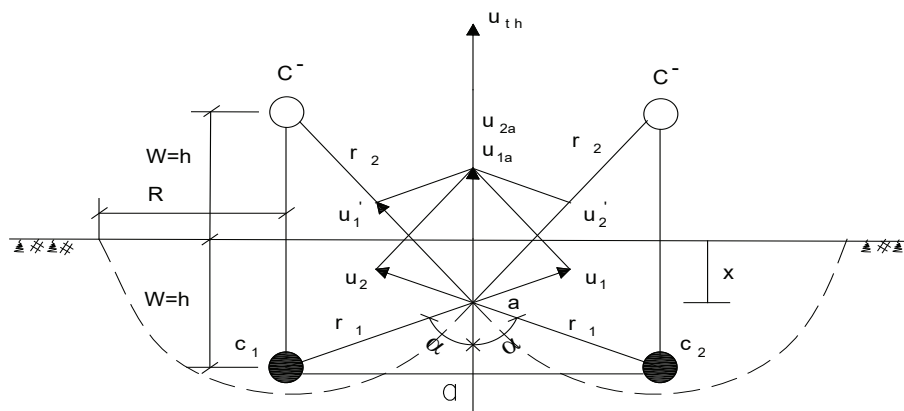


Рис. 2в. Суммарные векторы скорости зарядов C_1 , C_2 и мнимых зарядов (C^-)

Пунктир — — контур выбросной воронки при различных значениях расстояния a

Составляющая результирующей скорости, вызванная реальным зарядом C^+ и мнимым зарядом C^- , определяется по формулам (3) и (4) и имеет вид:

$$|\vec{u}_{1A}| = |\vec{u}_1| + |\vec{u}_1'|$$

$$\Rightarrow u_{1A} = u_0 \cdot r_0^2 \cdot \left[\frac{w-x}{[(\frac{a}{2})^2 + (w-x)^2]^{3/2}} + \frac{w+x}{[(\frac{a}{2})^2 + (w+x)^2]^{3/2}} \right]$$

Составляющая результирующей скорости, вызванная реальным зарядом C^+ и мнимым зарядом C^- , в соответствии с формулами (3) и (4) имеет вид:

$$|\vec{u}_{2A}| = |\vec{u}_2| + |\vec{u}_2'|$$

$$\Rightarrow u_{2A} = u_0 \cdot r_0^2 \cdot \left[\frac{w-x}{[(\frac{a}{2})^2 + (w-x)^2]^{3/2}} + \frac{w+x}{[(\frac{a}{2})^2 + (w+x)^2]^{3/2}} \right]$$

Составляющая результирующей скорости, вызванная реальным зарядом C^+ и двумя мнимыми зарядами C^- , имеет вид:

$$u_A = u_{1A} + u_{2A} = 2 \cdot u_0 \cdot r_0^2 \cdot \left[\frac{w-x}{[(\frac{a}{2})^2 + (w-x)^2]^{3/2}} + \frac{w+x}{[(\frac{a}{2})^2 + (w+x)^2]^{3/2}} \right]$$

Частица массива горных пород в точке А разрушается, когда результирующая скорость, действующая на неё, достигает критического значения: $u_A = u_{кр}$

3. Численное моделирование в программном комплексе ANSYS AUTODYN

3.1. Исследуемая модель

Для моделирования использовалась программа ANSYS AUTODYN для исследования процесса взрыва двух зарядов TNT в бетонной среде.

Основные допущения:

— Два одинаковых заряда TNT размещены в бетоне вблизи свободной поверхности для формирования выбросной воронки с постоянной глубиной заложения $W = h = 20$ см; расстояние между зарядами a варьируется.

Параметры модели:

- Масса каждого заряда: $Q = 120$ г;
- Приведённый радиус заряда: $r = 2,6$ см;
- Глубина заложения: $W = 20$ см;
- Расстояние между зарядами: $a = 10; 20; 30$ см;

- Размеры расчётной области: 1000×1500 мм;
- Среда моделирования: взрывчатое вещество TNT; бетон; воздух.

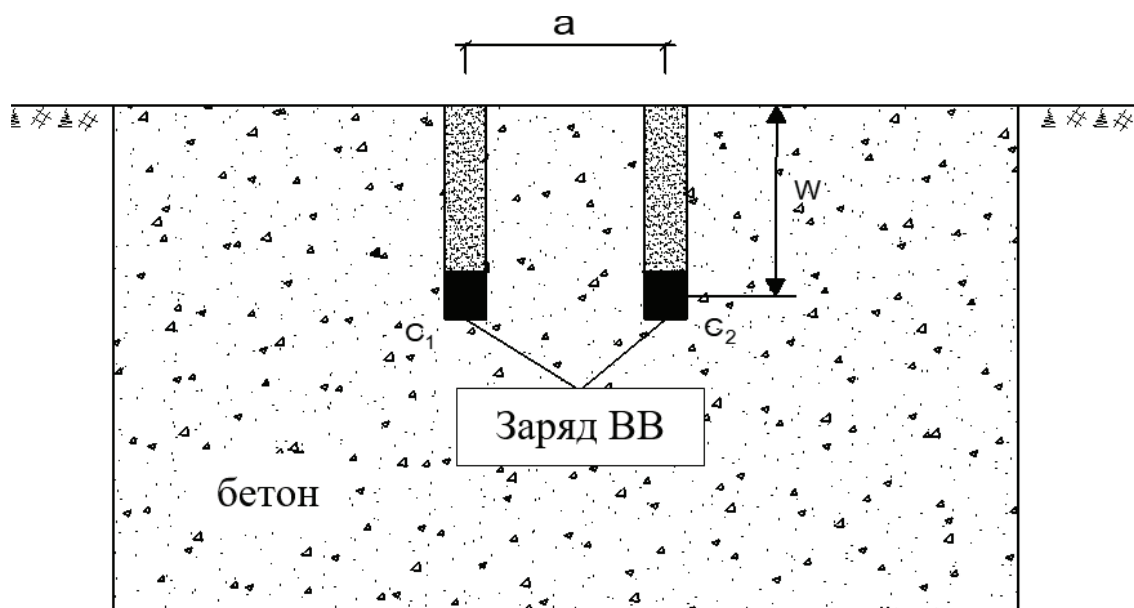


Рис. 3. Схема расположения двух зарядов

3.2. Процесс моделирования

Моделирование выполнялось в несколько этапов:

- Построение геометрической модели;
- Разбиение на конечные элементы;
- Задание материалов и граничных условий;
- Задание условий инициирования;
- Решение задачи и обработка результатов.

Расчётная модель задачи представлена на рис. 4.

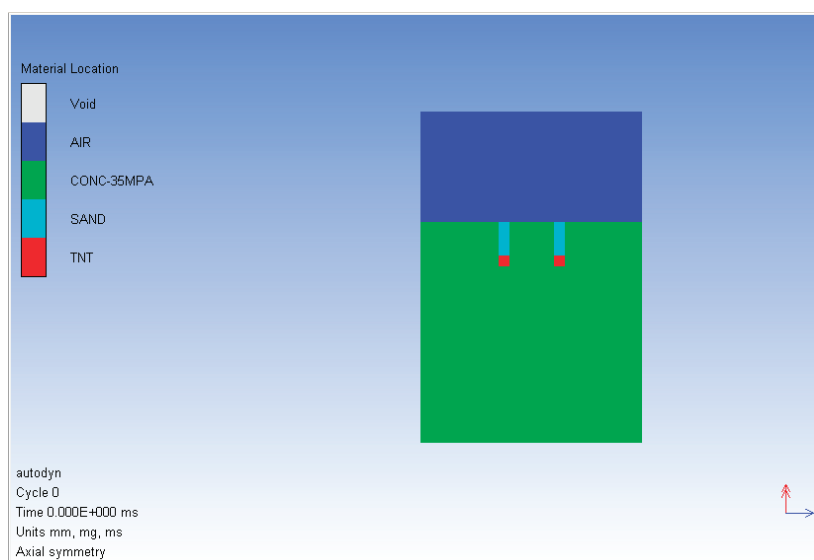


Рис. 4. Модель задачи до инициирования

При последовательном решении задач с расстоянием $a = 10; 20; 30$ см получены изображения выбросных воронок, представленные на рисунках 5, 6 и 7.

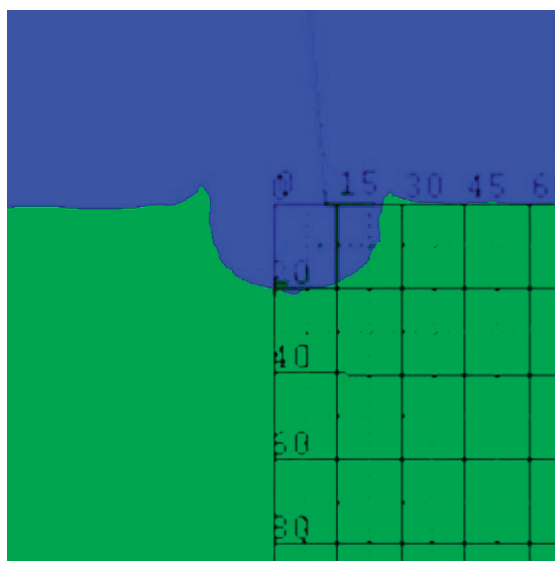


Рис. 5. Выбросная воронка при $a = 10$ см

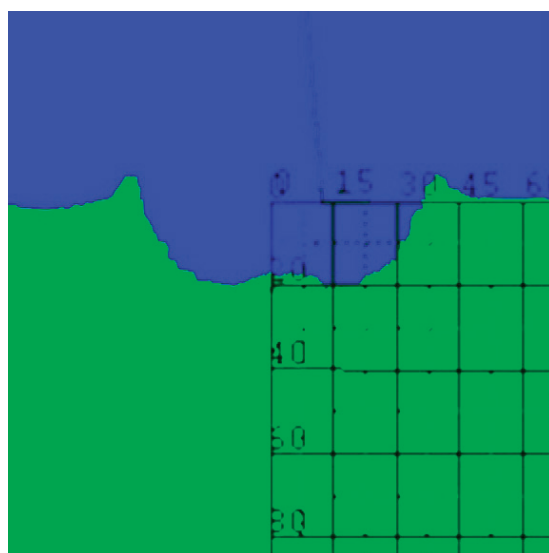


Рис. 6. Выбросная воронка при $a = 20$ см

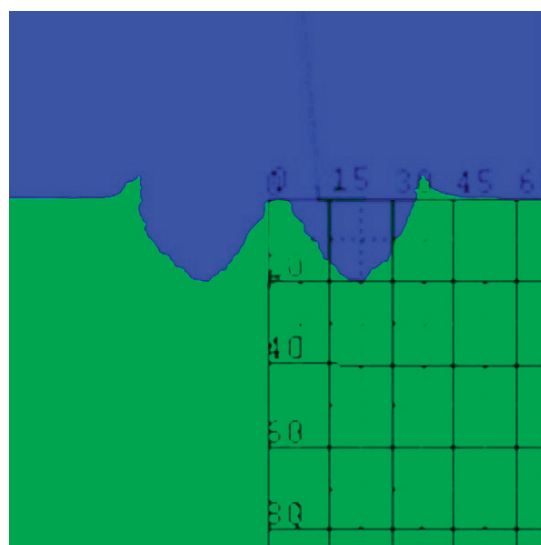


Рис. 7. Выбросная воронка при $a = 30$ см

3.3. Результаты моделирования

На основе результатов моделирования получены следующие данные:

Таблица 1. Сводная таблица результатов

№	Масса заряда С (г)	Глубина заложения W (см)	Расстояние а (см)	Глубина разрушения х (см)	Примечание
1	120	20	10	22	Разрушение глубже уровня заложения
2	120	20	20	18	Образуется небольшой подошвенный выступ
3	120	20	30	0	Значительный подошвенный выступ; зона между зарядами не разрушена

Замечание: Оптимальное расстояние между двумя зарядами, при котором не образуется подошвенный выступ: $10 \leq a_{tu} \leq 20$ см.

3.4. Сравнение с эмпирической формулой

Оптимальное расстояние между сосредоточенными зарядами в одном ряду определяется выражением:

$$a_n = 0,7 \cdot w \cdot \sqrt{n^2 + 1}$$

Расчёт для трёх случаев:

Таблица 2. Значения а, вычисленные по эмпирической формуле

№	n	w	a	Примечание
1	0,5	20	15,6	слабый выброс
2	1	20	20	нормальный выброс
3	1.5	20	25	усиленный выброс

Для групповых зарядов оптимальным является режим нормального выброса породы ($n = 1$), обеспечивающий максимальные размеры выбросной воронки без образования гребней между соседними воронками. Принимается $n = 1$ и $a = 20$ см.

Полученные численные результаты хорошо согласуются с эмпирическими зависимостями.

4. Предложения по управлению паспортом буровзрывных работ

При размещении заряда на критической глубине $W=W_{th}$ необходимо регулировать расстояние между зарядами в зависимости от результатов взрыва:

- Если глубина подошвенного выступа $\Delta > 0$ — уменьшить расстояние а между зарядами;
- Если $\Delta < 0$ — увеличить расстояние а между зарядами;
- Оптимальное расстояние достигается при $\Delta = 0$ ($a=a_{tu}$).

5. Заключение и рекомендации

5.1. Заключение

— Разработана теоретическая модель взаимодействия двух сосредоточенных зарядов в полубесконечной среде со свободной поверхностью.

— При одинаковой массе заряда и глубине заложения изменение расстояния между зарядами существенно влияет на форму и размеры выбросной воронки.

— Чем ближе расположены заряды, тем выше концентрация энергии взрыва; при увеличении расстояния энергия рассеивается.

— При малом расстоянии между зарядами образуется непрерывная взрывная щель; при большом — возникают неразрушенные зоны и подошвенные выступы.

5.2. Рекомендации

При определении расстояния между зарядами в одном ряду и между рядами необходимо учитывать: массу заряда, радиус разрушения и назначение взрыва.

- Выполнять серию малых взрывов перед крупным для повышения точности результатов;
- При проведении взрывных работ выбирать метод мгновенного или короткозамедленного взрывания для повышения эффективности;
- В неоднородных горных породах производить экспериментальный подбор оптимального расстояния между зарядами.

Литература:

1. Хо Ши Зяо, Дам Чонг Тханг, Ле Ван Куен, Хоанг Туан Чунг. Химические взрывы: теория и практика. — Ханой: Издательство «Наука и техника», 2010.
2. Нгуен Ван Тинь, Дам Чонг Тханг, Нгуен Хоай Нам. Буровзрывные работы. — Ханой: Издательство Народной армии, 2012.
3. Дам Чонг Тханг, Буй Суан Нам, Чан Куанг Хиеу. Взрывные работы в горной промышленности и строительстве. — Ханой: Издательство естественных наук и технологий, 2015. — С. 153–160.
4. Нгуен Куанг Чунг, Ле Хонг Дык, Во Тхань Тунг. Взрывные работы. Том 1. — Ханой: Военно-техническая академия, 1998.
5. Нгуен Куанг Чунг, Во Тхань Тунг. Взрывные работы. Том 2. — Ханой: Военно-техническая академия, 2005.
6. Дам Чонг Тханг, Нгуен Хыу Ха, Фан Тхань Чунг. Основы теории взрыва. — Ханой: Военно-техническая академия, 2022.
7. Дам Чонг Тханг, Нгуен Хыу Ха, Фан Тхань Чунг, Ле Хонг Хай. Взрывные работы в строительстве. — Ханой: Военно-техническая академия, 2023.
8. Руководство для инженерных войск: подрывные работы. — М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1961.
9. Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use. — Prague: Academia, 1979.

Радиопередающие устройства ракеты-носителя «Ангара». Проблемы оценки их функционирования при подготовке ракеты-носителя «Ангара» на стартовом комплексе и в полете, пути их решения

Лекомцев Денис Геннадьевич, научный сотрудник
АО Научно-производственное объединение «Новатор» (г. Мирный, Архангельская область)

В статье рассмотрены пути развития способов передачи телеметрической информации (ТМИ) современных российских ракет-носителей (РН). Проведен анализ методов оценки систем передачи ТМИ по средствам радиопередающих устройств ракет-носителей семейства «Ангара».

Ключевые слова: радиопередающие устройства РН «Ангара», бортовые телеметрические системы, измерительная телеметрическая система «Орбита IV».

Введение

На сегодняшний день подготовка РН семейства «Ангара» на техническом (ТК) и стартовом комплексах (СК) включает проверку радиопередающих устройств по следующей методике:

Проверка качества сигнала радиопередающих устройств с помощью станций МПРС-С. Эта операция позволяет оценить информационную составляющую радиосигнала ТМИ, её соответствие структуре сигнала «Орбита IV».

Проверка падающей и отраженной мощности сигнала передающего устройства. Эта операция позволяет оце-

нить мощность радиосигнала ТМИ на выходе передатчика и согласование тракта передачи радиосигнала между передатчиком и усилителем.

Проверка падающей и отраженной мощности сигнала усилительного устройства. Эта операция позволяет оценить мощность радиосигнала ТМИ на выходе усилителя и согласование тракта передачи радиосигнала между усилителем и передающей антенной.

Проверка приема сигнала радиопередающих устройств РН комплексом средств измерений, сбора и обработки информации (КСИСО). Эта операция позволяет оценить мощность и информационную составляющую радиосигнала ТМИ, её соответствие структуре сигнала «Орбита IV».

Тем не менее, при проведении одного из пусков РН «Ангара» был выявлен факт прерывания передачи ТМИ в момент отделения агрегатного модуля (АМ) от второй ступени ракеты космического назначения (РКН).

Анализ причин пропадания передачи ТМИ от РКН на КСИСО

При проведении запуска космического аппарата (КА) ракетой-носителем 14А125 наблюдалось пропадание сигнала ТМИ на средствах КСИСО на 16 секунд в период разделения АМ и второй ступени РН.

Информационно-телеметрическая система (ИТС) «Орбита IVАН1.2–02», установленная на ракетном блоке второй ступени, имеет следующие основные характеристики:

- Информативность — М16
- несущая частота, литеры — 074
- выходная мощность, Вт, около — 20
- ток потребления, А, не более — 15
- линия задержки, сек. — 8

Нарушение канала передачи ТМИ от РН на средства КСИСО произошло из-за наложения сразу нескольких факторов.

Взаимное расположение РН и ИП сложилось таким образом, что сигнал ТМИ от антенн экранировался плазменным полем от факела двигателя второй ступени.

Пропадание сигнала превысило время отставания передачи информации каналом задержки.

Траектория полёта РН проходила на границе предельной дальности гарантированного приёма средствами КСИСО.

При анализе ТМИ выявлено завышенное значение отраженной мощности на выходе передающего устройства второй ступени РН, что могло повлиять на снижение выходной мощности сигнала.

Пути решения проблем пропадания передачи ТМИ от РКН на КСИСО

Уверенный приём ТМИ достигается необходимым энергетическим потенциалом радиоканала «Борт-Земля», который определяется техническими характеристиками бортовых и наземных радиотехнических средств.

Технические характеристики, влияющие на энергетический потенциал радиоканала следующие:

- скорость (информативность) передачи информации;
- коэффициент усиления бортовой антенной системы;
- мощность бортового передающего устройства;
- коэффициент усиления наземной антенной системы;
- допустимое соотношение сигнал/шум наземных приёмных систем;
- суммарный коэффициент потерь при передаче сигнала.

Дальность уверенного (гарантированного) приёма телеметрической информации ИТС оценивается по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{P_b G_b S_{эф}}{4\pi K_n P_{пр}}}$$

R — дальность уверенного приёма (м);

P_b — мощность бортового передатчика (Вт);

G_b — коэффициент усиления бортовой антенны;

K_n — коэффициент потерь в элементах радиолинии;

$S_{эф}$ — эффективная площадь антенны (м²);

$P_{пр}$ — чувствительность приёмника (Вт).

Фазированная антенная решетка (ФАР) — антенна, состоящая из группы излучателей, фазой сигнала в которых можно управлять независимо, формируя эффективное излучение антенны в целом на одном, желаемом направлении, отличном от направления эффективного излучения отдельного элемента. Таким образом, появилась возможность эффективно управлять лучом антенны электронным способом.

Использование ФАР в качестве передающей антенны сигнала ТМИ РН позволит существенно повысить коэффициент усиления бортовой антенны G_b по отношению каждого канала приёма средств КСИСО.

Входной сигнал делится на множество каналов, соответствующих количеству элементов решетки, сигнал в каждом канале получает фазовое смещение, необходимое для определенного положения луча (лучей) решетки в пространстве.

Следует разделять два основных вида систем на фазированных антенных решетках — пассивные антенные решетки и активные. Основное различие таково: в пассивных антенных решетках имеется один мощный приемопередатчик, чей сигнал делится на все каналы, условно содержание только элемент поворота фазы. В активных фазированных решетках (АФАР) канал каждого элемента решетки имеет свой собственный приемопередатчик. Каждая из концепций имеет свои плюсы и минусы: пассивные решетки значительно дешевле, но требуют применения очень мощных источников сигнала. Активные решетки имеют огромный запас по надежности — выход из строя одного приемопередатчика не приводит к поломке всей системы, но количество используемых компонентов и сложность управления, синхронизации.

Однако развитие современной базы электронных компонентов, миниатюризация и вывод в массовое производство еще совсем недавно штучных технологий позволяют

системам на АФАР вытеснять пассивные решетки в авиационной, военной и космической технике.

Поэтому в дальнейшем заострим внимание именно на системах АФАР. Их применение в радиопередающих системах ТМИ РН практически и экономически целесообразно. В качестве передающих АФАР можно применить антенны с небольшим количеством антенн-излучателей (16–32 элемента).

РКН «Ангара» осуществляет вывод полезной нагрузки по заранее известной траектории. Зоны радиовидимости средств КСИСО, осуществляющих контроль полёта РН так же известны заранее. Таким образом, заложив программу полёта в ИТС, можно сосредоточить направление

диаграммы направленности АФАР на каждом этапе полёта РКН для каждого измерительного пункта (ИП). Это позволит существенно повысить мощность сигнала ТМИ на входах приёмных трактов средств КСИСО. Так же есть возможность предусмотреть аварийный режим работы системы в случае возникновения нештатных ситуаций, когда диаграмма направленности будет близка к 180° по вертикали и горизонтали относительно плоскости установки антенной решётки.

Энергопотребление систем АФАР для передачи ТМИ РН, с учётом применения современных радиоэлектронных компонентов, будет находится на уровне потребления имеющейся ИТС РН «Ангара».

Литература:

1. Инструкция по подготовке КСИСО к запуску КА. Часть вторая. Параметры радиосвязи телеметрических средств при групповом запуске РКН «Ангара-1.2». 2025. — 24 с.
2. ИТС «Орбита-IVAN1.2». Руководство по эксплуатации. ЯГАИ.468157.126 РЭ. 2020. — 405 с.

Актуальные проблемы оценки пропускной способности взлетно-посадочной полосы аэропорта

Сергеев Никита Михайлович, студент

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова

В настоящей статье представлен обзор основной проблематики, возникающей при оценке пропускной способности взлетно-посадочных полос аэропортов в современных условиях. Существующие методики в некоторой степени уже можно считать устаревшими и не учитывающими современные достижения науки и техники.

Ключевые слова: аэропорт, взлетно-посадочная полоса, пропускная способность, взлетно-посадочные операции, воздушное судно, аэронавигация, аэровокзал, перрон, аэродром.

Прогресс не стоит на месте, и вместе с увеличением потока воздушных перевозок возникают новые технологии и методы обслуживания, которые неизбежно влияют на пропускную способность аэропортов.

Пропускная способность аэропорта — это комплексный интегральный показатель, демонстрирующий, сколько пассажиров или воздушных судов в единицу времени способен обслужить аэропорт. Комплексность показателя обусловлена необходимостью учета пропускной способности элементов аэропорта: взлетно-посадочной полосы, перрона, рулежных дорожек, мест стоянки воздушных судов, аэровокзала, привокзальной площади и т. д. Если по какому-либо из элементов наблюдается сильный дисбаланс — то это говорит о недостатках проектирования, либо, наоборот, ориентации на перспективу.

Как известно, строительство или реконструкция взлетно-посадочных полос — это крайне затратный процесс, как с точки зрения финансовых средств, так и с точки зрения временных затрат.

Отсюда становится актуальным вопрос увеличения пропускной способности взлетно-посадочных полос без проведения реконструкции, то есть за счет применения инновационных технологий и методик, а также за счет организационных изменений [5].

Тем не менее, ввиду того же технологического прогресса, с учетом появления новых технологий в части управления воздушным движением в районе аэродрома, в части управления емкостью перронов и рулежных дорожек, в части скорости обслуживания воздушных судов и появления протоколов совместного принятия решений (A-CDM), оценка реальной пропускной способности, проведенная по существующим методикам Минтранса [2] или ИКАО, может быть недостоверной. Стоит отметить, что международная организация гражданской авиации (ИКАО) не разрабатывала прямого документа, который бы полностью регламентировал методику оценки пропускной способности взлетно-посадочной полосы (ВПП), но при этом, отдельные аспекты отражены, например, в Руководстве по проектированию аэродромов.

Итак, существующая методика оценки пропускной способности взлётно-посадочной полосы (ВПП) имеет ряд недостатков, которые могут влиять на точность расчётов. К ним можно отнести следующее:

1. Возникновение новых факторов. Пропускная способность аэродрома зависит от множества факторов, включая взлётно-посадочные характеристики самолётов, интервалы между операциями для безопасности полётов, условия движения по правилам визуального полёта и полёта по приборам, планировочную схему ВПП и соединительных рулежных дорожек, неравномерность подхода самолётов на посадку, соотношение типов самолётов в интенсивности движения [5]. Также нельзя забывать и о пропускной способности аэровокзала и иных пассажирских зон, поскольку при превышении их пропускной способности, формируются заторы уже на перроне. Однако не все эти факторы могут быть полностью учтены в существующих методиках.

2. Предположение о равномерности движения самолётов. При определении фактической пропускной способности часто предполагается, что взлётно-посадочные операции осуществляются непрерывно через одинаковые интервалы времени, равные средним фактическим интервалам. На практике из-за случайных факторов равномерность нарушается: ВПП может бездействовать из-за отсутствия самолётов, готовых к взлёту или посадке, а в некоторые периоды времени образовываться очередь [4].

3. Ограничения в моделировании сложных систем. Например, при использовании методов, основанных на теории массового обслуживания, может возникать «комбинаторный взрыв» при росте числа узлов и ёмкости буферов, что делает такие методы вычислительно затратными для крупных сетей. Также существуют сложности с моделированием взаимодействия воздушных судов и процессов управления воздушным движением (УВД), особенно в условиях высокой интенсивности полётов и сложных диспетчерских схем.

4. Отсутствие единой утверждённой методики расчёта. В некоторых случаях существуют лишь рекомен-

дации, а не жёстко регламентированные методики расчёта пропускной способности аэродрома.

5. Влияние внешних факторов, не учитываемых в расчётах. Пропускную способность аэропорта ограничивают не только возможности ВПП, но и риски возникновения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве, эффективность работы наземных служб, особенно в пиковые часы. Например, попытки ассоциировать пропускную способность аэропорта с пропускной способностью взлетно-посадочной полосы (ВПП) также встречают серьезные возражения, связанные с отсутствием учета возможных ограничений, возникающих в воздушном пространстве аэродромной зоны. Эти ограничения связаны с наличием пересечений траекторий взлетающих и заходящих на посадку воздушных судов (ВС) и существующими минимумами эшелонирования. Другими словами, по свидетельству авиадиспетчеров, кроме ВПП, возникает еще одно «узкое место», лимитирующее величину пропускной способности — это область повышенной концентрации ВС в воздушной зоне аэропорта [3].

6. Проблемы с данными. При отсутствии фактических данных о суточных или часовых объёмах воздушных перевозок и интенсивности движения воздушных судов показатели могут определяться расчётным способом как среднесуточные, что может снижать точность оценок.

7. Отсутствие учета современных технических и программных средств. Методика была разработана еще в 2011 году и с тех пор не корректировалась, но за 15 лет появилось множество технико-программных средств для оптимизации процессов обслуживания, что не может не влиять на пропускную способность.

Таким образом, для повышения точности оценки пропускной способности ВПП рекомендуется учитывать больше факторов, использовать более сложные математические модели (например, гибридные или имитационные), а также проводить валидацию моделей с использованием реальных данных и учетом программных средств.

Литература:

1. «Воздушный кодекс Российской Федерации» от 19.03.1997 N 60-ФЗ (ред. от 28.11.2025) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2026)
2. Приказ Минтранса РФ от 24 февраля 2011 г. N 63 «Об утверждении Методики расчета технической возможности аэропортов и Порядка применения Методики расчета технической возможности аэропортов» (с изменениями и дополнениями)
3. Агафонова И. Ю., Рудельсон Л. Е., Степанова А. И. Модель операций взлета и посадки для расчета пропускной способности аэродрома // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-operatsiy-vzleta-i-posadki-dlya-rascheta-propusknoy-sposobnosti-aerodroma> (дата обращения: 26.05.2026).
4. Кузнецов В. Л., Чепурина А. А. Об одной аналитической модели пропускной способности аэропорта // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 169. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-odnoy-analiticheskoy-modeli-propusknoy-sposobnosti-aeroporta> (дата обращения: 26.05.2026).
5. Сайдумаров, И. М. Исследование по определению пропускной способности взлетно-посадочной полосы аэропорта / И. М. Сайдумаров, Г. К. Мамадиёрова. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2018. — № 19 (205). — С. 164–166. — URL: <https://moluch.ru/archive/205/50256>. (дата обращения: 25.05.2026)

Современные методы увеличения пропускной способности взлетно-посадочных полос аэропортов

Сергеев Никита Михайлович, студент

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова

Данная статья посвящена актуальному вопросу увеличения пропускной способности взлетно-посадочных полос (ВПП) аэродромов гражданской авиации. Ввиду дороговизны и сложности реконструкции ВПП, на первый план выходят технологические методы и цифровизация, которые позволяют с меньшими затратами наиболее эффективным образом повысить пропускную способность.

Ключевые слова: аэродром, взлетно-посадочная полоса, интенсивность полетов, пропускная способность, взлетно-посадочные операции, воздушное судно, рулежная дорожка.

Modern methods of increasing the capacity of airport runways

This article is devoted to the urgent issue of increasing the capacity of runways (runways) of civil aviation airfields. Due to the high cost and complexity of runway reconstruction, technological methods and digitalization are coming to the fore, which make it possible to increase throughput in the most efficient way with lower costs.

Keywords: airfield, runway, flight intensity, capacity, takeoff and landing operations, aircraft, taxiway.

Одним из самых важных элементов аэропорта (аэродрома) считается взлетно-посадочная полоса (или несколько).

Официальное определение взлётно-посадочной полосы (ВПП) в Российской Федерации закреплено в Приказах Минтранса России. В частности, согласно Приказу Минтранса России от 25 ноября 2011 года № 293 [3], взлётно-посадочная полоса (ВПП) — это часть аэродрома, предназначенная для разбега при взлёте и пробега после посадки воздушных судов.

Это определение также упоминается в других нормативных документах, например, в СНИП 32–00–96 и справочниках по терминологии [5].

Пропускная способность взлетно-посадочной полосы — одна из самых важных характеристик аэродрома, поэтому, определив ее, возможно, прогнозировать другие показатели аэропорта.

Официальное определение закреплено в Приказа Минтранса России от 1 ноября 2024 года № 388. В нём указано: «Пропускная способность — число взлётно-посадочных операций в час» [2].

Пропускная способность всех остальных элементов аэропорта по сути лишь приводится в соответствие с максимально возможной пропускной способностью взлетно-посадочной полосы.

Пропускная способность определяется через минимально допустимые интервалы между взлётно-посадочными операциями ВС, которые устанавливаются из условий обеспечения безопасности полётов. Эти интервалы зависят от типа полётов (по правилам визуальных полётов (ПВП) или полётов по приборам (ППП)), планировки аэродрома, характеристик воздушных судов, метеословий и других факторов, что определено в приложении к Приказу Минтранса РФ от 24 февраля 2011 года № 63 [4].

Современные методы повышения пропускной способности взлётно-посадочных полос (ВПП) включают как технологические инновации, так и организационные подходы. Они направлены на оптимизацию потоков воздушных судов, улучшение управления воздушным движением и модернизацию инфраструктуры аэродромов.

Технологические и цифровые решения:

1. Цифровизация аэронавигации. Внедрение сервисов D-ATIS (цифровой передачи метеорологических данных и информации о ВПП), DCL (цифрового получения диспетчерского разрешения на взлёт), CPDLC (текстового обмена сообщениями между диспетчером и экипажем) и 4D-навигации (высокоточного управления полётом по заданной пространственно-временной траектории) направлено на повышение безопасности, эффективности использования воздушного пространства и пропускной способности.

2. Системы AMAN (Arrival Manager) и DMAN (Departure Manager). Автоматизированные менеджеры прибытия и вылетающих воздушных судов оптимизируют очереди, регулируют очередность и рассчитывают интервалы при входе ВС в зону подхода. Это позволяет минимизировать задержки и повысить пропускную способность аэродрома [6].

3. Концепция A-CDM (Airport Collaborative Decision-Making). Совместное принятие решений между аэропортом, авиакомпаниями, органами ОВД и другими участниками процесса. Интеграция информационных систем и разработка единых процедур и технологий взаимодействия способствуют более эффективному планированию рейсов и распределению ресурсов.

4. Системы Point Merge (слияния потоков). Включают траектории задержки, расположенные с взаимным перекрытием в створе ВПП. Позволяют формировать равные

потоки на точки входа, что повышает эффективность использования ВПП.

Организационные и инфраструктурные меры:

1. Совершенствование структуры маршрутов руления и площадей маневрирования. Например, строительство дополнительных рулевых дорожек (РД) для разведения потоков рулящих ВС, исключение пересечения ВПП, создание мест временного ожидания ВС при рулении («карманов»), расширение предварительных стартов для параллельного размещения нескольких ВС.

2. Удлинение ВПП. Например, удлинение первой ВПП на коротком участке за точкой пересечения продольных осей с переносом зоны ожидания старта за пределы другой ВПП.

3. Использование зональной навигации (RNAV). Метод позволяет выполнять полёт по любой желаемой траектории в пределах зоны действия наземных или космических авиационных средств, что способствует гибкому построению схем и повышению пропускной способности.

4. Моделирование и анализ пиковых нагрузок. Грамотное моделирование и анализ пиковых часов и необходимой вместимости аэропорта в тот или иной промежуток времени помогают адекватно распределять ресурсы.

Таким образом, комплексное применение этих методов позволяет повысить пропускную способность ВПП, снизить задержки рейсов, оптимизировать использование ресурсов аэродрома и повысить безопасность полётов.

Литература:

1. Воздушный кодекс РФ//Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/
2. Приказ Минтранса России от 01.11.2024 N 388 «Об утверждении методик расчета показателей национального проекта «Эффективная транспортная система» и входящего в него федерального проекта «Развитие опорной сети аэродромов»
3. Приказ Минтранса РФ от 25 ноября 2011 г. N 293 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Организация воздушного движения в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями)
4. Приказ Минтранса РФ от 24 февраля 2011 г. N 63 «Об утверждении Методики расчета технической возможности аэропортов и Порядка применения Методики расчета технической возможности аэропортов» (с изменениями и дополнениями)
5. Свод правил СП 121.13330.2019 «СНиП 32–03–96 Аэродромы» (утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 января 2019 г. N 64/пр) (с изменениями и дополнениями)
6. Княжский, А. Ю. Потенциальная возможность увеличения пропускной способности взлетно-посадочной полосы с использованием менеджера вылетов воздушных судов (DMAN) / А. Ю. Княжский, А. П. Плясовских // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. — 2019. — № 1(22). — С. 96–103.
7. Сайдумаров, И. М. Возможности повышения эффективности пропускной способности взлетно-посадочной полосы аэродрома / И. М. Сайдумаров, И. Ж. Бойманов, У. А. у. Каршиев // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: материалы XIII Международной научно-практической конференции, Иркутск, 10–11 октября 2024 года. — Иркутск: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2024. — С. 199–205.

Информационное обеспечение оперативного управления наземным обслуживанием бизнес-авиации: состав данных, источники и архитектура потоков

Фомин Алексей Дмитриевич, студент магистратуры

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова

Предметом исследования является информационное обеспечение оперативного управления наземным обслуживанием воздушных судов бизнес-авиации. Применялись методы системного анализа, функциональной декомпозиции и структурного проектирования информационных систем. Выявлен и классифицирован состав данных, необходимых диспетчеру оперативного управления в каждый момент технологического цикла. Описаны основные источники данных и существующие информационные системы наземного обслуживания. Предложена трёхуровневая архитектура информационных потоков, ориентированная на специфику бизнес-авиации: нерегулярность рейсов, широкую вариативность типов воздушных судов и индивидуализированные требования клиентов.

Ключевые слова: информационное обеспечение, оперативное управление, наземное обслуживание, бизнес-авиация, информационные потоки, FBO, диспетчер, суточный план полётов.

Оперативное управление аэропортовой деятельностью предполагает разработку тактических целей и планов действий, которые должны строго исполняться и постоянно контролироваться. Цель оперативного управления — реализация плановых заданий и борьба с отклонениями от них [1]. В этом определении ключевым является слово «отклонение»: управление возможно лишь тогда, когда диспетчер располагает своевременной и достоверной информацией о фактическом состоянии технологического процесса, ресурсов и внешней операционной среды.

Бизнес-авиация усиливает значимость информационного обеспечения по сравнению с регулярными перевозками: отсутствие фиксированного расписания, широкая вариативность типов воздушных судов (ВС) и нестандартные запросы клиентов означают, что система управления должна работать с постоянно обновляющимся и слабоструктурированным потоком данных. Оптимизация технологических процессов со значительной минимизацией производственных затрат эффективно достигается за счет практического внедрения достижений в области информационных технологий [3, с. 46].

1. Информационное обеспечение как направление оперативного управления

Оперативное управление главным оператором аэропорта (ГОА) осуществляется по четырём основным направлениям: управление производственными процессами, информационное обеспечение аэропортовой деятельности, финансовое управление и материально-техническое снабжение [1]. Тем самым информационное обеспечение выделяется как самостоятельное направление оперативного управления, а не просто как его инструмент — что принципиально важно для понимания его роли в системе.

Задачей оперативного управления является максимально возможное равномерное распределение полётов ВС в течение суток при максимальном использовании пропускной способности предприятия, человеческих ресурсов, средств механизации и автоматизации [1]. Достижение этой задачи невозможно без непрерывного мониторинга текущего состояния всех задействованных ресурсов и рейсов. Для повышения эффективности управления рекомендуется применять информационно-технические решения [1].

В контексте бизнес-авиации информационное обеспечение приобретает дополнительное измерение. Если в регулярной авиации информационный поток в значительной мере предсказуем — расписание формируется заблаговременно и отклонения от него относительно

редки, — то в бизнес-авиации значительная часть информации поступает в режиме реального времени или с минимальным горизонтом прогнозирования. Это предъявляет качественно иные требования к архитектуре информационных систем оператора FBO.

2. Состав данных для оперативного управления: классификация

Систематизация состава данных, необходимых диспетчеру оперативного управления наземным обслуживанием бизнес-авиации, позволяет выделить три функциональных блока.

Блок данных о рейсах и воздушных судах включает: данные о прилёте/вылете (расчётное и фактическое время, позывной, тип ВС, регистрационный номер, пункт назначения), состав экипажа, количество и состав пассажиров, груз и специальные грузы.

Блок данных о технологическом процессе включает: текущий статус выполнения технологического графика обслуживания (ТГО), фактическое время начала и окончания каждой операции, отклонения от нормативного графика, статус готовности ВС к вылету.

Блок данных о ресурсах включает: укомплектованность смен персонала по специальностям, статус технической готовности наземного оборудования, занятость мест стоянок, остатки топлива и расходных материалов.

3. Источники данных и существующие информационные системы

Данные о рейсах и ВС поступают из нескольких источников. Первичным источником для коммерческих рейсов является суточный план полётов (СПП), формируемый на основе сезонного расписания авиакомпаний. В бизнес-авиации роль аналогичного источника выполняет система приёма и обработки заявок на обслуживание — как правило, в режиме реального времени по каналам прямой связи с клиентом или его представителем. Данные о фактическом движении ВС поступают от службы управления воздушным движением через систему обмена оперативными данными.

Отечественным примером комплексной системы информационного обеспечения наземного обслуживания является АС «КОБРА» [4] — автоматизированная система, обеспечивающая поддержку решений в области оперативного управления рейсами. Система реализует функции суточного планирования, мониторинга хода обслуживания и формирования отчётности в едином информационном пространстве [1].

Для операторов бизнес-авиации применение крупных аэропортовых систем зачастую избыточно по функцио-

нальности и стоимости. Специализированные FBO-системы — такие как IS-GHMS [2] ориентированы именно на перронное обслуживание и позволяют вести технологические нормы обслуживания ВС, управлять перечнем услуг по договорам наземного обслуживания и осуществлять диспетчеризацию спецтранспорта.

4. Архитектура информационных потоков для FBO бизнес-авиации

Архитектура информационных потоков в системе оперативного управления наземным обслуживанием бизнес-авиации должна учитывать специфику операционной среды: нерегулярность поступления заявок, высокую вариативность состава услуг и критическую чувствительность к задержкам. Предлагается трёхуровневая архитектура, соответствующая логике оперативного цикла управления.

Первый уровень — уровень сбора и первичной обработки данных обеспечивает агрегацию данных из разнородных источников: системы приёма заявок, каналов связи с диспетчерской службой аэропорта, метеорологических сервисов, мобильных устройств персонала на перроне. Ключевым требованием к этому уровню является минимизация задержки поступления данных: для критически важных событий — отказ оборудования, изменение времени вылета — задержка не должна превышать нескольких секунд.

Второй уровень — уровень ситуационной осведомлённости формирует интегрированную картину текущего состояния операционной среды для диспетчера. Этот уровень реализует функции: актуализации статуса всех обслуживаемых ВС в едином рабочем пространстве, визуализации отклонений от ТГО с указанием причины и ответственного, мониторинга доступности ресурсов в реальном времени, прогнозирования конфликтов ресурсов при параллельном обслуживании нескольких ВС.

Третий уровень — уровень архивирования и аналитики обеспечивает накопление данных о фактическом ходе обслуживания для последующего анализа. На этом уровне формируются базы данных о реальной продолжи-

тельности операций, типичных причинах отклонений, закономерностях спроса.

5. Требования к информационному обеспечению в специфических условиях бизнес-авиации

Специфика бизнес-авиации формирует ряд дополнительных требований к информационному обеспечению оперативного управления, которые не актуальны или менее значимы для регулярных перевозок.

Требование конфиденциальности данных о рейсах. Информационная система FBO должна поддерживать разграничение доступа к данным рейса с возможностью присвоения статуса конфиденциальности на уровне заявки.

Требование гибкости обработки заявок. Информационная система должна обеспечивать оперативное обновление ТГО при изменении заявки с автоматическим уведомлением всех задействованных исполнителей.

Требование интеграции с внешними информационными системами. Диспетчер FBO бизнес-авиации работает в информационном пространстве, включающем системы управления воздушным движением, таможенные и пограничные информационные системы, метеослужбы, системы заказчиков услуг. Интеграция с этими системами через стандартизированные интерфейсы обмена данными является необходимым условием эффективного оперативного управления.

Заключение

Предложенная классификация состава данных по трем функциональным блокам — данные о рейсах и ВС, о технологическом процессе, о ресурсах и формирует полный перечень информации, необходимой диспетчеру в каждый момент оперативного цикла.

Трёхуровневая архитектура информационных потоков — уровень сбора данных, уровень ситуационной осведомлённости и уровень аналитики — обеспечивает непрерывность информационного обеспечения от регистрации первичных событий до формирования аналитической базы для предиктивного управления.

Литература:

1. Эккельман М. М., Конилова Е. В. Оперативное управление ресурсами при наземном обслуживании воздушных судов // NA-Journal. 2023. № 5. URL: <https://na-journal.ru/5-2023-ekonomika-menedzhment/5416-operativnoe-upravlenie-resursami-pri-nazemnom-obslujivanii-vozdushnyh-sudov> (дата обращения: 20.04.2026).
2. IS-GHMS — система управления спецтранспортом и обслуживанием воздушного судна на перроне // Инициативные системы: сайт. URL: http://initsys.ru/products/ground_handling/ghms/ (дата обращения: 22.04.2026). — ob-sluzhivaniem-reysov (дата обращения: 22.04.2026).
3. В. К. Цуцкарёв Особенности организации технологического процесса наземного обслуживания рейсов бизнес-авиации в Российской Федерации // URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-organizatsii-tehnologicheskogo-protssesa-nazemnogo-obsluzhivaniya-reysov-biznes-aviatsii-v-rossiyskoy-federatsii/viewer> (дата обращения: 20.04.2026).
4. АО «Ривц-Пулково» [Электронный ресурс]: сайт URL: <https://rivc-pulkovo.ru/>

Современные методы управления роем БПЛА: обзор подходов и ограничений существующих решений

Шкляев Юрий Викторович, аспирант
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

В статье рассматриваются современные методы управления роем беспилотных летательных аппаратов. Выполнен анализ централизованных и децентрализованных подходов к управлению, методов обучения с подкреплением, мульти-агентного обучения, нейросетевых технологий и алгоритмов роевого интеллекта. Исследованы преимущества и недостатки существующих решений с точки зрения устойчивости, масштабируемости и адаптивности. Проведен сравнительный анализ современных подходов и выявлен научный пробел, связанный с отсутствием универсального метода управления, обеспечивающего одновременно высокую отказоустойчивость, адаптивность и эффективность функционирования роя БПЛА. Определены перспективные направления дальнейших исследований в области интеллектуального управления группами беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: рой БПЛА, управление БПЛА, мультиагентные системы, MARL, роевой интеллект, нейронные сети, устойчивость управления, FANET.

Введение

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к беспилотным авиационным системам, способным выполнять широкий спектр задач в гражданской и военной сферах. Особое внимание исследователей привлекают роевые беспилотные летательные аппараты, представляющие собой распределенные мультиагентные системы, в которых достижение общей цели обеспечивается посредством координированного взаимодействия множества автономных агентов [1].

Использование роя БПЛА позволяет существенно повысить эффективность выполнения задач мониторинга территорий, поисково-спасательных операций, экологического контроля, сопровождения объектов и телекоммуникационного обеспечения. По сравнению с одиночными летательными аппаратами рой обладает большей отказоустойчивостью, гибкостью применения и возможностью распределения функциональной нагрузки между агентами [2].

Одновременно увеличение количества взаимодействующих БПЛА приводит к усложнению процессов управления. Возникает необходимость организации надежного обмена информацией между агентами, согласования коллективных действий, предотвращения столкновений и адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. Решение указанных задач требует применения современных методов искусственного интеллекта, распределенного управления и самоорганизующихся сетевых технологий [3].

Целью исследования является анализ современных методов управления роем БПЛА, выявление ограничений существующих подходов и определение перспективных направлений развития интеллектуальных систем управления группами беспилотных летательных аппаратов.

Методы исследования основаны на анализе отечественных и зарубежных публикаций, посвященных управлению роем беспилотных летательных аппаратов.

Для достижения поставленной цели использовались методы системного и сравнительного анализа научных работ в области мультиагентных систем, искусственного интеллекта и роевых технологий.

Особенности роевых систем БПЛА

Рой БПЛА представляет собой распределенную мультиагентную систему, в которой выполнение общей задачи обеспечивается за счет взаимодействия автономных агентов. В отличие от одиночных беспилотных аппаратов подобная организация позволяет повысить отказоустойчивость и расширить область наблюдения при выполнении миссии [6].

Важным условием функционирования роя является организация устойчивого обмена данными между агентами. Для решения данной задачи используются сети FANET, обеспечивающие самоорганизующееся взаимодействие беспилотных летательных аппаратов в условиях динамически изменяющейся топологии сети [5].

Эффективность роя определяется не только характеристиками отдельных БПЛА, но и качеством координации между участниками группы, механизмами распределения задач и поддержания сетевой связности [4].

Централизованные методы управления

Централизованные методы управления предполагают наличие единого управляющего узла, осуществляющего сбор информации от всех агентов роя и формирование управляющих воздействий. Подобный подход обеспечивает возможность построения глобального плана выполнения задачи и позволяет учитывать текущее состояние всей системы при принятии решений [7].

К преимуществам централизованной архитектуры относятся возможность глобальной оптимизации маршрутов движения, централизованное распределение задач между агентами и упрощенная реализация алгоритмов

координации. Наличие единого центра управления позволяет эффективно контролировать выполнение общей миссии и обеспечивать согласованность действий группы.

Несмотря на указанные преимущества, централизованные системы обладают рядом существенных недостатков. Основным ограничением является наличие единой точки отказа. Выход из строя центрального управляющего узла способен привести к полной потере управления роем и прекращению выполнения поставленной задачи. Кроме того, при увеличении количества агентов существенно возрастает объем передаваемых данных и вычислительная нагрузка на управляющий центр, что негативно влияет на масштабируемость подобных решений [15].

Дополнительной проблемой является высокая чувствительность к нарушениям каналов связи. Потеря связи между агентами и центром управления способна привести к снижению эффективности функционирования роя и возникновению ошибок координации. По этой причине централизованные методы чаще используются в системах с ограниченным числом агентов либо в задачах, не предъявляющих высоких требований к отказоустойчивости [11].

Децентрализованные методы управления

Альтернативой централизованным архитектурам являются децентрализованные методы управления, основанные на локальном взаимодействии агентов. В подобных системах каждый БПЛА самостоятельно принимает решения на основе информации о состоянии окружающей среды и данных, получаемых от соседних элементов роя [15].

Отсутствие центрального управляющего узла позволяет существенно повысить отказоустойчивость системы. Даже при потере отдельных агентов рой сохраняет способность к выполнению поставленной задачи за счет перераспределения функций между оставшимися участниками группы. Данное свойство является одним из ключевых преимуществ децентрализованных систем управления [5].

Еще одним достоинством является высокая масштабируемость. Увеличение количества агентов не приводит к пропорциональному росту нагрузки на отдельный элемент системы, поскольку вычисления распределяются между всеми участниками роя. Благодаря этому децентрализованные методы рассматриваются как перспективное направление развития крупномасштабных роевых систем [14].

Однако реализация подобных подходов связана с рядом сложностей. Основными проблемами являются обеспечение согласованности действий агентов, предотвращение конфликтов управления и поддержание устойчивого информационного обмена между элементами сети. Кроме того, эффективность работы роя существенно за-

висит от качества используемых протоколов взаимодействия и алгоритмов коллективного принятия решений [7].

Методы обучения с подкреплением

Одним из наиболее активно развивающихся направлений в области интеллектуального управления БПЛА являются методы обучения с подкреплением (Reinforcement Learning). В отличие от традиционных алгоритмов управления, RL позволяет агенту самостоятельно формировать стратегию поведения на основе опыта взаимодействия со средой [12].

В процессе обучения агент получает информацию о состоянии среды, выполняет определенные действия и получает числовую оценку результата в виде функции вознаграждения. На основе накопленного опыта происходит корректировка стратегии поведения, направленная на максимизацию суммарного вознаграждения. Благодаря этому агент способен адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и принимать решения в условиях неопределенности [13].

В системах управления роем БПЛА методы обучения с подкреплением используются для решения задач планирования маршрутов, распределения ресурсов, предотвращения столкновений и адаптации к динамически изменяющимся условиям выполнения миссии. Современные исследования демонстрируют высокую эффективность подобных алгоритмов при решении сложных задач автономного управления [12].

Вместе с тем применение RL связано с рядом ограничений. Для обучения агентов требуются значительные вычислительные ресурсы и большое количество обучающих эпизодов. Кроме того, эффективность алгоритма во многом определяется корректностью выбора функции вознаграждения и параметров обучения. Указанные особенности ограничивают возможности практического применения методов обучения с подкреплением в системах с ограниченными вычислительными ресурсами [13].

Multi-Agent Reinforcement Learning

В отличие от классического обучения с подкреплением, методы Multi-Agent Reinforcement Learning (MARL) ориентированы на совместное обучение нескольких взаимодействующих агентов. Такой подход позволяет учитывать влияние действий каждого БПЛА на поведение всей группы и использовать коллективные стратегии при решении задач координации, распределения целей и планирования маршрутов [14].

Преимуществом MARL является возможность организации распределенного принятия решений без постоянного централизованного управления. Вместе с тем увеличение числа агентов приводит к росту вычислительных затрат и усложняет процесс обучения, что остается одной из основных проблем практического применения данного подхода [12, 14].

Роевой интеллект и методы Particle Swarm Optimization

Методы роевого интеллекта основаны на моделировании коллективного поведения природных систем. Одним из наиболее распространенных алгоритмов данной группы является Particle Swarm Optimization (PSO), используемый для решения задач планирования маршрутов, распределения задач и согласования действий агентов [9].

Алгоритм PSO обеспечивает коллективный поиск решений на основе обмена информацией между участниками роя и отличается сравнительной простотой реализации. Однако его эффективность может снижаться вследствие преждевременной сходимости к локальному оптимуму, особенно в сложных динамических средах [10].

Нейросетевые методы управления роем БПЛА

Нейронные сети применяются в системах управления роем БПЛА для обработки данных сенсоров, распознавания объектов, прогнозирования изменений среды и поддержки принятия решений [13].

В современных исследованиях особое внимание уделяется совместному использованию нейронных сетей и методов обучения с подкреплением, а также графовым нейронным сетям, позволяющим учитывать структуру взаимодействия агентов внутри роя [12, 15]. Подобные решения рассматриваются как перспективное направление повышения автономности и адаптивности роевых систем.

Выявленные ограничения существующих решений

Проведенный анализ современных исследований показывает, что ни один из существующих подходов не обеспечивает полного решения задачи устойчивого управления роем БПЛА.

Во-первых, централизованные методы обладают единой точкой отказа. Нарушение функционирования управляющего узла способно привести к потере координации действий всей группы и существенному снижению эффективности выполнения миссии [15].

Во-вторых, методы обучения с подкреплением требуют значительных вычислительных ресурсов и больших объемов обучающих данных. Для многих практических задач использование подобных алгоритмов на борту малолетающих БПЛА остается затруднительным [12].

В-третьих, алгоритмы роевого интеллекта могут сталкиваться с проблемой локальных оптимумов, что ограничивает качество получаемых решений в сложных динамических средах [9].

В-четвертых, многие современные методы демонстрируют недостаточную масштабируемость при увеличении количества агентов. Рост размера роя приводит к увеличению объемов передаваемой информации и усложнению процессов координации [14].

Следует отметить, что большинство исследований сосредоточено на решении отдельных задач управления. В научной литературе сравнительно редко рассматриваются подходы, объединяющие одновременно методы обучения с подкреплением, роевой интеллект, нейросетевые технологии и распределенное управление. Анализ публикаций показывает, что вопросы комплексного обеспечения устойчивости, адаптивности и масштабируемости остаются недостаточно проработанными [2, 11, 14].

Таким образом, можно сформулировать следующий научный пробел: в настоящее время отсутствует универсальный подход, обеспечивающий одновременно высокий уровень адаптивности, устойчивости и масштабируемости управления роем БПЛА.

Перспективные направления развития систем управления роем БПЛА

Современные тенденции развития беспилотных систем свидетельствуют о постепенном переходе от использования отдельных алгоритмов управления к построению комплексных интеллектуальных архитектур. Перспективным направлением является интеграция методов искусственного интеллекта, распределенного управления и сетевых технологий в рамках единой системы принятия решений.

Особый интерес представляет развитие гибридных подходов, объединяющих преимущества Reinforcement Learning, Multi-Agent Reinforcement Learning, методов роевого интеллекта и нейросетевых технологий. Подобные решения способны обеспечить более высокий уровень адаптивности системы к изменяющимся условиям среды и повысить устойчивость роя к отказам отдельных агентов [12].

Среди перспективных направлений развития роевых систем выделяются технологии цифровых двойников, используемые для моделирования поведения БПЛА в различных сценариях функционирования [4]. Одновременно возрастает актуальность обеспечения безопасности FANET-сетей и защиты системы управления от внешних воздействий [2].

Классификация современных методов управления роем БПЛА представлена на рисунке 1.

Заключение

Проведенный обзор показал, что существующие подходы к управлению роем БПЛА решают различные аспекты коллективного взаимодействия агентов, однако не обеспечивают одновременного достижения адаптивности, отказоустойчивости и масштабируемости системы. Анализ литературы свидетельствует о том, что большинство исследований сосредоточено на развитии отдельных методов управления, тогда как вопросы их комплексной интеграции остаются недостаточно изученными.

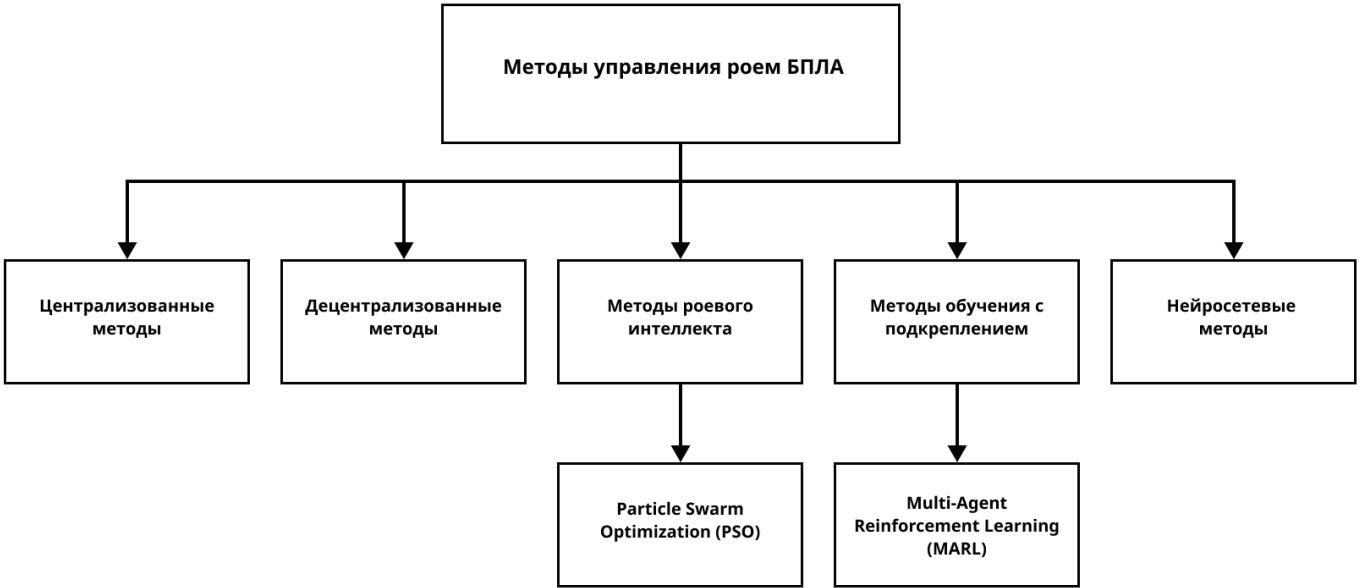


Рис. 1. Классификация современных методов управления роем БПЛА

Централизованные архитектуры обеспечивают высокий уровень координации, но чувствительны к отказу управляющего узла. Децентрализованные методы обладают большей устойчивостью, однако требуют эффективных механизмов согласования действий агентов. Методы обучения с подкреплением и MARL расширяют возможности адаптации системы к изменяющимся условиям среды, тогда как алгоритмы роевого интеллекта позволяют решать задачи коллективной оптимизации.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о перспективности гибридных подходов, объединяющих преимущества различных методов управления. Разработка подобных решений представляет интерес для дальнейших исследований в области интеллектуальных мультиагентных систем и роевых технологий БПЛА.

Сравнительная характеристика современных методов управления роем БПЛА представлена в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика современных методов управления роем БПЛА

Метод управления	Преимущества	Недостатки	Устойчивость
Централизованное управление	Глобальная оптимизация, централизованное распределение задач, единый контроль	Единая точка отказа, ограниченная масштабируемость, высокая нагрузка на центр управления	Низкая
Децентрализованное управление	Отсутствие единой точки отказа, высокая отказоустойчивость, масштабируемость	Сложность координации агентов, зависимость от качества обмена данными	Высокая
Reinforcement Learning	Адаптация к изменяющейся среде, автономность принятия решений	Высокие вычислительные затраты, длительное обучение	Средняя
Multi-Agent Reinforcement Learning	Коллективное обучение, учет взаимодействия агентов, адаптивность	Сложность обучения, проблемы масштабирования	Средняя–высокая
Particle Swarm Optimization	Эффективное распределение задач, коллективный поиск решений, простота реализации	Возможность попадания в локальный оптимум	Средняя
Нейронные сети	Анализ данных, прогнозирование среды, распознавание объектов	Требовательность к вычислительным ресурсам и обучающим данным	Средняя
FANET	Самоорганизация сети, гибкость взаимодействия агентов	Уязвимость к сетевым атакам и нарушениям связи	Средняя
Гибридные методы	Совмещение преимуществ различных подходов	Сложность реализации и интеграции компонентов	Потенциально высокая

Литература:

1. Довгаль В. А. Использование оперативного метода планирования задач для роя дронов при поддержке языковой модели // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2024. Вып. 2 (341). С. 78–85.
2. Довгаль В. А., Довгаль Д. В. Анализ уязвимостей и угроз безопасности роя дронов с поддержкой Wi-Fi, противостоящего атакам злоумышленников // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2020. Вып. 3 (266). С. 67–73.
3. Уланов С. И., Криводубский О. А., Никитина А. А. Методы использования беспилотных летательных аппаратов в полете // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 2 (33). С. 29–35.
4. Быков Н. В., Товарнов М. С., Федулов В. А. Имитационное моделирование и оценка эффективности систем обнаружения и противодействия беспилотным транспортным средствам, несущим угрозу нормальному функционированию «умного города» // Вестник РФФИ. 2024. № 1 (121). С. 54–65.
5. Погодин Р. А., Широков И. Б. Система управления роя БПЛА // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы международной научно-технической конференции. Севастополь, 2022. С. 285–287.
6. Костоготов А. А., Михайлов Г. Г. Перспективы применения роевых технологий в сфере беспилотной авиации // Информатизация образования — 2024: материалы Международной научно-практической конференции. Липецк: ЛГТУ, 2024. С. 197–204.
7. Лосев В. В., Ковалев Д. И., Ворошилова А. А., Туева Е. В. Обзор перспективных проектов в области устойчивого территориального развития и глобальных киберфизических систем // Информатика. Экономика. Управление. 2023. Т. 2. № 2. С. 401–413.
8. Rahman M., Islam M., Uddin J. A Survey on Multi-UAV Path Planning // Drones. 2025. Vol. 9. No. 4. Article 263.
9. Cheng Q., Zhang Z., Du Y., Li Y. Research on Particle Swarm Optimization-Based UAV Path Planning Technology in Urban Airspace // Drones. 2024. Vol. 8. No. 12. Article 701. DOI: 10.3390/drones8120701.
10. Aljlaud F., Kurdi H., Youcef-Toumi K. Bio-inspired Multi-UAV Path Planning Heuristics: A Review // Mathematics. 2023. Vol. 11. No. 10. Article 2356.
11. Wang X., Zhao Z., Yi L., Ning Z., Guo L., Yu F. R., Guo S. A Survey on Security of UAV Swarm Networks: Attacks and Countermeasures // ACM Computing Surveys. 2024. Vol. 57. No. 3. Article 74. DOI: 10.1145/3703625.
12. Frattolillo F., Brunori D., Iocchi L. Scalable and Cooperative Deep Reinforcement Learning Approaches for Multi-UAV Systems: A Systematic Review // Drones. 2023. Vol. 7. No. 4. Article 236.
13. Bayerlein H., Theile M., Caccamo M., Gesbert D. Multi-UAV Path Planning for Wireless Data Harvesting with Deep Reinforcement Learning // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2021. Vol. 2. P. 1171–1187.
14. Zhao X., Yang R., Zhong L. Multi-UAV Path Planning and Following Based on Multi-Agent Reinforcement Learning // Drones. 2024. Vol. 8. No. 1. Article 18.
15. Zhao J., Sun J., Cai Z., Wang Y., Wu K. Distributed Coordinated Control Scheme of UAV Swarm Based on Heterogeneous Roles // Chinese Journal of Aeronautics. 2022. Vol. 35. No. 1. P. 81–97.

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Применение искусственного интеллекта в сельском хозяйстве

Градинарова Анастасия Евгеньевна, студент

Таганрогский институт имени А. П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета

Научный руководитель: Градинарова Маргарита Александровна, кандидат экономических наук, доцент
Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)

В статье рассматриваются современные направления применения искусственного интеллекта в сельском хозяйстве и его влияние на развитие агропромышленного комплекса. Выявлены и описаны основные технологии цифровизации аграрной сферы, а также преимущества и проблемы внедрения искусственного интеллекта в сельскохозяйственное производство.

Ключевые слова: искусственный интеллект, сельское хозяйство, цифровизация, агропромышленный комплекс, точное земледелие, роботизация, беспилотные технологии, аграрный сектор.

Сельское хозяйство всегда являлось одной из важнейших отраслей экономики. Именно от его устойчивого развития зависит продовольственная безопасность государства, уровень жизни населения и экономическая стабильность страны. Однако современный мир стремительно меняется, и сегодня аграрная отрасль уже невозможно представить без внедрения цифровых технологий и систем искусственного интеллекта.

Еще несколько лет назад многие воспринимали искусственный интеллект как технологию будущего, связанную исключительно с программированием или промышленностью. Сейчас ИИ активно внедряется в повседневную жизнь человека и становится важной частью агропромышленного комплекса.

Современное сельское хозяйство сталкивается с большим количеством проблем: нехваткой кадров, климатическими изменениями, ростом затрат на производство и необходимостью увеличения объемов продукции. В таких условиях использование искусственного интеллекта помогает оптимизировать процессы и значительно повысить эффективность работы сельхозпредприятий.

Одним из наиболее распространенных направлений применения ИИ является точное земледелие. Специальные цифровые системы анализируют состояние почвы, погодные условия, уровень влажности и качество посевов. Благодаря этому аграрии могут более точно определять сроки посева, нормы внесения удобрений и объемы полива.

Искусственный интеллект позволяет не только экономить ресурсы, но и увеличивать урожайность. Система способна заранее выявлять заболевания растений, обнаруживать вредителей и прогнозировать возможные

риски. Это особенно важно в условиях нестабильной погоды и изменения климатических условий.

Сегодня в сельском хозяйстве активно используются беспилотные технологии. Дроны помогают контролировать состояние полей, делать аэрофотосъемку, анализировать качество посевов и выявлять проблемные участки. Беспилотные тракторы и роботизированная техника уже применяются в крупных агрохолдингах для автоматизации сельскохозяйственных работ.

Кроме того, искусственный интеллект активно внедряется в животноводство. С помощью специальных систем фермеры могут отслеживать состояние животных, контролировать рацион питания и выявлять заболевания на ранних стадиях. Это помогает повысить качество продукции и снизить экономические потери.

Особую роль играет аналитика больших данных. Современные агропредприятия ежедневно получают огромный объем информации, который человеку сложно обработать самостоятельно. Искусственный интеллект способен анализировать данные значительно быстрее и точнее, помогая прогнозировать урожайность, рассчитывать риски и принимать эффективные управленческие решения.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение искусственного интеллекта в сельское хозяйство имеет и ряд проблем. Одной из основных является высокая стоимость оборудования и программного обеспечения. Не все хозяйства, особенно небольшие фермы, могут позволить себе современные цифровые технологии.

Также существует проблема нехватки специалистов, способных работать с системами искусственного интел-

лекта. Для эффективного внедрения цифровых решений необходимы квалифицированные кадры, обладающие знаниями как в сфере информационных технологий, так и в аграрной отрасли.

Однако, несмотря на существующие сложности, развитие искусственного интеллекта в сельском хозяйстве продолжает набирать обороты. В России активно реализуются программы цифровизации агропромышленного комплекса, внедряются инновационные технологии и создаются условия для модернизации сельхозпроизводства.

Можно сделать вывод, что искусственный интеллект становится важным инструментом развития современного сельского хозяйства. Использование ИИ помогает повысить производительность труда, сократить затраты, улучшить качество продукции и обеспечить устойчивое развитие аграрной отрасли.

В ближайшие годы цифровые технологии будут играть всё более значимую роль в сельском хозяйстве, а внедрение искусственного интеллекта станет неотъемлемой частью развития агропромышленного комплекса России.

Литература:

1. Горпинченко К. Н. Анализ применения искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Управленческий учет. — 2025.
2. Пьянкова С. Г. Искусственный интеллект как драйвер агротехнологий России // Экономика регионов. — 2025.
3. Искусственный интеллект в сельском хозяйстве // Tadviser. — 2025.
4. Газаева М. Ш. Состояние и перспективы искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Известия аграрного университета. — 2025.
5. Федеральный проект «Цифровое сельское хозяйство» // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации.

Классификация сошников для прямого посева

Микитюк Максим Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент

Алтайский институт повышения квалификации руководителей и специалистов агропромышленного комплекса (г. Барнаул)

Гребенюк Данил Петрович, аспирант

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (г. Новосибирск)

Стрикунов Николай Иванович, кандидат технических наук, доцент;

Хижников Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент

Алтайский государственный аграрный университет (г. Барнаул)

При написании данной работы нами были использованы различные варианты поиска информации: литературный обзор, патентные материалы, результаты исследований и испытаний сошников современных посевных машин. Хорошим информационным источником стала также всемирная сеть интернет. Полученная таким образом информация анализировалась, уточнялась при помощи схем, технических характеристик рабочих органов. Именно для этого в статье даётся классификационная информация обо всём многообразии технических средств для посева зерновых культур. Перед специалистами коллективных и фермерских хозяйств в этой связи стоит задача правильного выбора способа посева и высокоэффективного использования широкозахватных сеялочных агрегатов. Примеры рационального использования посевных комплексов есть и в России, и в ряде зарубежных стран. Внедрение посевных комплексов с новыми разработанными посевными секциями решает важные задачи дальнейшего совершенствования технологий посева зерновых культур и повышения эффективности посева связанной с увеличением урожайности. Проведённый авторами анализ существующих типов сошников посевных машин показывает, что совмещение технологических операций обработки почвы, посева и внесения удобрений с применением новых рабочих органов — один из наиболее перспективных путей повышения эффективности этих достаточно сложных технических систем. Надо сказать, что по техническому уровню технологического оборудования посевных комплексов отечественного производства не уступают аналогичным машинам зарубежных фирм. В данной статье сделана попытка обобщить и систематизировать информацию по сошникам с представлением развёрнутой их классификации.

Ключевые слова: сеялка, посевной комплекс, сошник, посевная секция, комбинированный сошник.

Введение

В хозяйствах АПК Алтайского края основу различных типов сеялочных агрегатов составляют следующие сош-

ники: дисковые, лаповые, анкерные. Накопленный опыт модернизации серийно выпускаемых сошников показывает на высокий уровень технологических параметров их функционирования, их способность существенно по-

высить качество посева. Особого внимания заслуживает модернизация лаповых сошников. Анализ зарубежных комбинированных посевных комплексов для прямого посева показывает, что основную долю применяемых конструкций сошников составляют дисковые и анкерные сошники. Этому есть научное обоснование технического оснащения сеялочных агрегатов. В этом направлении работают и отечественные предприятия по производству посевной техники.

Считаем, что обзор и анализ посевных машин с различными типами сошников позволит руководителям сельскохозяйственных предприятий, научным работникам лучше ориентироваться в предлагаемых технологиях посева, а заводам-изготовителям посевных машин определиться с перспективным направлением развития машин данного типа [1].

Поэтому **целью настоящей работы** является обзор и анализ конструкций сошников сеялочных агрегатов с разработкой их классификации.

Задачи настоящего исследования:

1. Провести анализ сошников, применяемых в сеялках и посевных комплексах для прямого посева по стерне.
2. Предложить классификацию сошников посевных машин.

Основная часть

Анализ существующих посевных агрегатов, применяемых в современных технологиях посева с различными сошниками, позволяет определить их технологические возможности [2]. Как показывает анализ, да и практический опыт применения того или другого типа сошников, наибольшим спросом пользуются комбинированные сошники [3, 4, 5, 6, 7].

Проследим тенденцию развития основных способов посева зерновых культур по максимальному количеству патентов на изобретения (полезные модели) (рисунок 1):

- 1) одновременное внесение различных форм минеральных удобрений;
- 2) посев зерновых культур, учитывающий общие вопросы совершенствования способов их посева;
- 3) бороздковый посев (посев в борозды);
- 4) посев зерновых в полосы;
- 5) разбросной способ посева;
- 6) рядковый способ посева;
- 7) грядный способ посева.

Для реализации отмеченных способов посева необходимы и соответствующие рабочие органы (РО) – сошники. Их совершенствование проводится по нескольким направлениям:

- при посеве по стерне или при прямом посеве первенство принадлежит лаповым РО (36 %);
- совершенствуются конструкции комбинированных рабочих органов, обеспечивающих посев зерновых с одновременной обработкой почвы для посева и уничтожения сорняков (23 %);
- высок ресурс совершенствования РО с использованием однодисковых сошников (9 %);
- изыскиваются различные способы совершенствования и использования при посеве зерновых двухдисковых сошников (4,1 %);
- широкое применение находят долотообразные РО и прослеживается тенденция их дальнейшего совершенствования (3,2 %);

Расширяется тенденция по созданию новых сошниковых групп с оригинальными техническими решениями, включающими в себя процесс внесения в почву жидких форм минеральных удобрений.

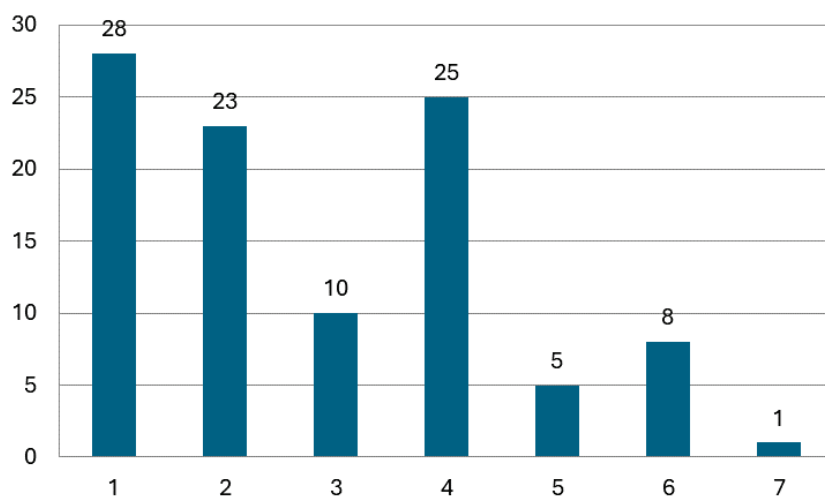


Рис. 1. Динамика патентования способов посева зерновых:

- 1 — способы посева зерновых с одновременным внесением различных форм минеральных удобрений;
 2 — посев зерновых, учитывающий общие вопросы совершенствования способов их посева;
 3 — способ посева в борозды (бороздковый посев); 4 — способ посева зерновых в полосы (полостной посев);
 5 — посев зерновых разбросным способом; 6 — посев зерновых рядковым способом; 7 — грядный способ посева

В современных сеялках для прямого посева используются дисковые, анкерные, долотообразные, или лаповые сошники. Применение данных РО зависит от задач эксплуатации, климатических и почвенных условий сельхоз-предприятий.

Анкерные сошники

Данные сошники имеют узкий наральный, изготовленный из чугуна или металла высокой твердости, установленный на стойку с различным углом вхождения в почву. Применяются на многих сеялках для прямого посева, проделывают узкую бороздку по стерневому фону укладывают семена и удобрения на уплотненное ложе и заделывают бороздку различными прикатывающими приспособлениями (колеса, катки т. д.)

У анкерных, или долотообразных, сошников имеется преимущество – способность прорезать твердую почву, перемещать пожнивные остатки и смещать почву с семенного ряда. Минусом данных сошников является сгуживание соломы при ее большом количестве (Primera DMC, Seed Master) и возможное отклонение глубины посева.

Долотообразный сошник очень схож с анкерным и отличается от него более узким наральником с прямым или немного заостренным углом вхождения в почву. Имеет те же преимущества, что и анкерный РО.

Лаповый сошник применяется при технологии mini-till: проводит рыхление почвы, подрезание стерни, внесение семян и различных удобрений.

Размер лапы связан конструкцией сеялки и ее междурядьями. Существуют две основные модификации лапы — стрельчатая и стелс. У стрельчатой лапы имеются крылья. Лапа стелс представляет собой полый треугольник, имеет более высокое сопротивление и плохую прорезающую способность в сложных условиях.

Двухдисковый сошник зарекомендовали себя в сеялках для посева зерновых культур по обработанной почве, а также с дополнительными приспособлениями для посева по нулевым технологиям (установка колтерного диска перед сошником). Диски хорошо прорезают почву делая V — образную бороздку, в которую укладываются семена растений. К основным преимуществам данных сошников можно отнести минимальное повреждение целостности почвы. Установка прикатывающих катков или задних копирующих колес устраняет подъем почвы под воздействием дисков.

Сошники со смещенными относительно друг друга дисками хорошо проникают в землю и дают возможность высевать семена и удобрения на разную глубину. Установка между дисками пластиковых уплотнителей позволяет разравнивать семена в борозде и повышает их контакт с почвой.

Двухдисковый рабочий орган техники Salford 520 за счет параллелограммного механизма присоединения к раме копирует неровности поля и поддерживает установленную глубину заделки на высоких скоростях.

На сеялках прямого посева компании Semeato для посева узко- и широкорядных культур устанавливается дифазный сошник, разработанный специально под технологию no-till и предусматривающий два диска с различной величиной диаметров.

Однодисковый сошник (монодиск) представляет гладкий или сферический диск, установленный под углом к вертикали. Он хорошо прорезает бороздку в неподготовленной почве и высевает семена.

Однодисковые сошники практически не требуют технического обслуживания, поскольку они чрезвычайно износостойки. Данные РО менее чувствительны к растительным остаткам на поле и некачественно проведенной предпосевной обработке почвы. При применении делителей возможен разноуровневый высев.

Комбинированные сошники представляют собой соединение в один орган несколько сошников: дисково-анкерный, двухдисковый с наральником, лаповый с различными приспособлениями для внесения удобрений и т. д.

Дисково-анкерный сошник Cross Slot, создает крестообразную борозду в форме перевернутой буквы Т с минимальным нарушением структуры почвы. При этом расстояние между семенами и удобрениями составляет 2–3 см, что позволяет максимально сохранять влагу и обеспечивать оптимальные условия для развития культуры даже в условиях засухи.

Рабочий орган Turbosem представляет собой монодисковый сошник. Он формирует V-образную борозду для внесения семян и удобрений через анкер на глубину 3–4 см, минимально сдвигая почвенный слой.

Комбинированные сошники Stealth имеют модульную конструкцию, со сменными наконечниками и приспособлениями. Анкер для узкополосного посева в ряды шириной от 22 до 25 мм, установка специальных дополнительных сошников, предназначенных для туков, позволяет за один проход выполнять разноуровневое внесение семян и удобрений. Сошник Stealth можно оборудовать стрельчатыми лапами для узкополосного или широкополосного посева с подпочвенным внесением удобрений.

Проведенный анализ показал, что наибольшая доля всех исследований принадлежит лаповым рабочим органам, высокими темпами идет развитие комбинированных посевных РО, а также однодисковых сошников.

На основании проведенных аналитических исследований предлагаем развёрнутую классификацию сошников сеялочных агрегатов для работы по минимальной или нулевой системе земледелия (рисунок 2).

Заключение

Для выбора способа и обоснования конструкции сошников при посеве зерновых культур проведены патентные исследования с целью получения исходных данных для разработки классификации данных технических средств.

Реализация основных способов посева зерновых культур требует разработки технических решений по со-

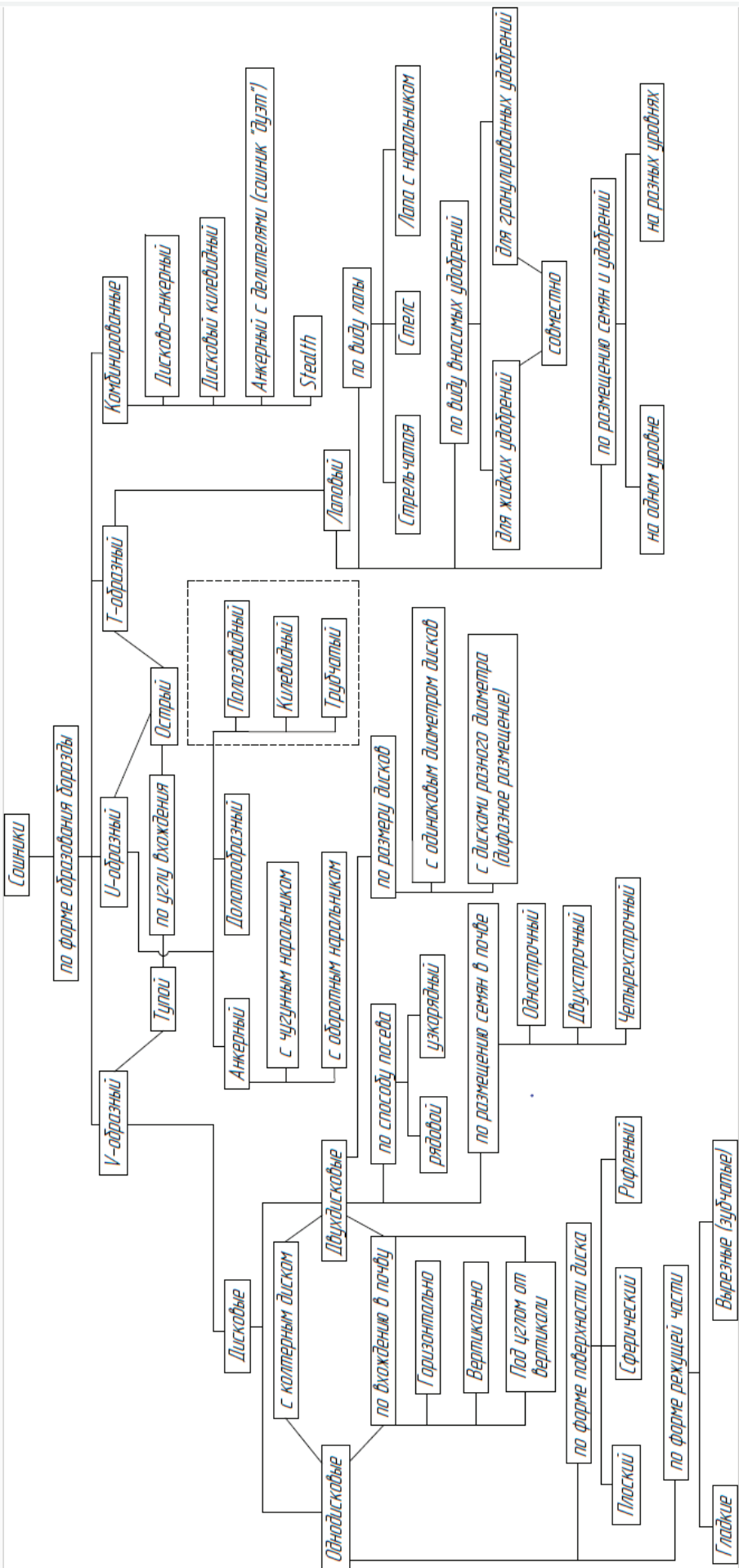


Рис. 2. Классификация сошников сеялочных агрегатов (посевных машин)

вершенствованию рабочих органов –сошников, направленных на повышение урожайности и полевой всхожести возделываемых культур.

Широко исследуются и применяются комбинированные сошники, совмещающие обработку почвы (лаповые сошники), внесение удобрений в твердой и жидкой формах, посев.

Литература:

1. Несмиян, А. Ю. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур / А. Ю. Несмиян, Ю. С. Ценч // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. № 3. С. 45–52.
2. Мударисов, С. Г. Результаты агротехнической оценки комбинированного сошника / С. Г. Мударисов, А. М. Мухаметдинов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 1(13). С. 100–101.
3. Ногтиков, А. А. Развитие конструкций комбинированных рабочих органов посевных машин / А. А. Ногтиков, В. П. Бычков // Достижения науки и техники АПК. 2002. № 1. С. 25–26.
4. Патент на полезную модель № 224117 U1 Российская Федерация, МПК А01С 7/20. Комбинированный сошник: № 2023131978: заявл. 05.12.2023; опубл. 18.03.2024 / М. С. Чекусов, А. А. Кем, А. Н. Шмидт, Е. М. Михальцов; заявитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр».
5. Кем, А. А. Комбинированный сошник для посева зерновых культур / А. А. Кем, М. С. Чекусов, А. Н. Шмидт // Сельский механизатор. 2021. № 3. С. 6–7.
6. Демчук, Е. В. Комбинированный сошник зерновой сеялки / Е. В. Демчук, В. В. Мяло // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2014. № 1. С. 81–83.
7. Ахалая, Б. Х. Технология комбинированного способа посева и высевающие аппараты для его осуществления / Б. Х. Ахалая, Ю. С. Ценч, С. А. Квас // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 4(33). С. 61–65.

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 22 (625) / 2026

Выпускающий редактор Г. А. Письменная
Ответственные редакторы Е. И. Осянина, О. А. Шульга, З. А. Огурцова
Художник Е. А. Шишков
Подготовка оригинал-макета П. Я. Бурьянов, М. В. Голубцов, О. В. Майер

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.
Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.
При перепечатке ссылка на журнал обязательна.
Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал размещается и индексируется на портале eLIBRARY.RU, на момент выхода номера в свет журнал не входит в РИНЦ.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-38059 от 11 ноября 2009 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN-L 2072-0297

ISSN 2077-8295 (Online)

Учредитель и издатель: ООО «Издательство Молодой ученый». 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.

Номер подписан в печать 10.06.2026. Дата выхода в свет: 17.06.2026.

Формат 60×90/8. Тираж 500 экз. Цена свободная.

Почтовый адрес редакции: 420140, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Юлиуса Фучика, д. 94А, а/я 121.

Фактический адрес редакции: 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.

E-mail: info@moluch.ru; <https://moluch.ru/>

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.