

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан в 1997 году,
«Серия Г: Технические науки»
основана в 2018 году*

Серия Г:
Технические
науки

2/2026

Редакционная коллегия журнала
«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов**.

Зам. главного редактора – канд. техн. наук, доц. **И.А. Третьяков**.

Ответственный секретарь – канд. техн. наук, доц. **Е.Д. Пометун**.

Члены редколлегии: д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; д-р техн. наук, проф. **Л.В. Алексейчик**; д-р техн. наук, проф. **И.В. Аникин**; канд. физ.-мат. наук, с.н.с. **П.В. Асланов**; канд. физ.-мат. наук **А.В. Безус**; д-р техн. наук, доц. **И.А. Бершадский**; д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков**; д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, доц. **К.А. Выговтов**; д-р техн. наук, доц. **А.П. Глухов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, доц. **А.В. Звягинцева**; д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори**; д-р техн. наук, доц. **В.В. Карнаух**; канд. техн. наук, с.н.с. **А.А. Курушин**; д-р техн. наук, доц. **И.И. Лившиц**; чл.-корр. АК РФ, д-р физ.-мат. наук, доц. **О.А. Логачев**; д-р физ.-мат. наук, проф. **И.Л. Любчанский**; канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён**; д-р техн. наук, проф. **А.С. Петров**; акад. РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов**; д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; д-р техн. наук, доц. **Д.В. Шевцов**; канд. техн. наук, доц. **О.Г. Шелехова**.

The Editorial Board of the journal
«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov**.

The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech., doc. **I.A. Tretiakov**.

Assistant Editor – Cand. of tech., doc. **E.D. Pometun**.

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Dr. of tech., prof. **L.V. Alekseychik**; Dr. of tech., prof. **I.V. Anikin**; Cand. of phys. and math., s. researcher **P.V. Aslanov**; Cand. of phys. and math. **A.V. Bezus**; Dr. of tech., doc. **I.A. Bershadskii**; Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov**; Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskii**; Dr. of tech., doc. **K.A. Vytovtov**; Dr. of tech., doc. **A.P. Glukhov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., doc. **S.V. Gridin**; Cand. of tech., doc. **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., doc. **T.V. Zavadskaia**; Dr. of tech., doc. **A.V. Zviagintseva**; Dr. of tech., doc. **S.A. Zori**; Dr. of tech., doc. **V.V. Karnaukh**; Cand. of tech., s. researcher **A.A. Kurushin**; Dr. of tech., doc. **I.I. Livshits**; RAC Corresponding Member, Dr. of phys. and math., doc. **O.A. Logachev**; Dr. of phys. and math., prof. **I.L. Liubchanskii**; Cand. of tech., doc. **I.A. Molokovskii**; Cand. of tech., doc. **V.V. Paslen**; Dr. of tech., prof. **A.S. Petrov**; RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov**; Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **M.N. Sheptsov**; Dr. of tech., doc. **D.V. Shevtsov**; Cand. of tech., doc. **O.G. Shelekhova**.

Адрес редакции: 283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://dongu-vestnik04.ru>

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

С 12.02.2024 г. журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ**) (категория **К2** с 13.12.2024 г.) по следующим научным специальностям и соответствующей им отрасли (технические науки):

- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры,
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы,
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения,
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций,
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика,
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы,
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами,
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей,
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы,
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника,
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы,
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 230-11/2025 от 17.11.2025 г.): http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984

*Издается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:
Протокол №12 от 05.06.2026 г.*

Вестник Донецкого национального университета

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён 65-летию первого
полёта человека в космос

№ 2/2026

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- Пометун Е.Д. Информационно-измерительная система для оценки биомеханической прочности дерева 5
- Панарин В.М., Рылеева Е.М., Маслова А.А. Построение информационно-измерительной системы контроля полей загрязнения водных объектов промышленно развитых территорий 14
- Федоров С.А., Безус А.В., Безус Ю.А. Естественная оптическая активность неидеальных сверхрешеток со стереоизомерными примесными слоями 23
- Казаков В.В., Карповский А.Ю., Довгань А.Ю. Метод расчета расстояния от повернутого объекта до границ ограниченного пространства 30

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Федяев О.И., Суханов А.А. Исследование качества нейросетевого распознавания студентов при входе в аудиторию путём моделирования видеопотока изображений лиц из базы данных 43
- Третьяков И.А., Данилов В.В., Подлесный В.Ю., Колесник Е.В. Оценка эффективности адаптивных и циклических систем сбора данных в ИИС АСУ и АСНИ 58
- Звягинцева А.В., Бражников А.Р. Интегральный показатель информационной сложности многомерных систем на основе JS-дивергенции и структурного расстояния 69
- Недоедко А.О., Сухоруков С.И. Автоматизация сборки дверей летательных аппаратов с применением роботизированного комплекса 86
- Стрижко М.А., Червинский В.В. Модуль автоматического управления дополнительными светофорными фазами при интеллектуальном регулировании транспортных потоков на перекрёстках 100
- Бабищева М.В. Анализ уязвимости LLM05 (некорректная обработка выходных данных) 108
- Пономарёв Д.С. Сравнительный анализ гибридных архитектур AE-LSTM и AE-TRANSFORMER на примере задачи прогнозирования месячного объема выпуска деревообрабатывающих производств 115

<i>Устенко В.Ю., Пикалёв Я.С. Исследование стратегий селективной аугментации для семантической сегментации аэрофотоснимков БПЛА</i>	127
---	-----

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Захаров А.С., Аетов А.У., Саяхов Р.Х., Гильмутдинов И.М. Численное моделирование теплопередачи в аппаратах воздушного охлаждения газа с учетом влияния внешних воздействий</i>	141
<i>Горошков В.А., Коровкин Н.В., Гришенцев А.Ю., Герасимов И.В., Вэньлун И., Касьянов А.В. Метод идентификации токов в проводниках воздушной линии по данным датчиков магнитного поля</i>	159
<i>Копейка Д.В., Бирюков А.Б. Анализ фактических теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий различного назначения</i>	176
<i>Паскарь И.Н., Кудряшов Д.С. Сетевые ограничения и пути повышения надёжности энергосистемы Кузбасса</i>	183
<i>Кожухов Н.Н., Надеев А.А., Прутских Д.А., Дубанин В.Ю., Наумов А.М. Моделирование аэродинамики погружного теплообменного элемента с кольцевыми трубками</i>	198
<i>Сайфутдинов Р.Х. Моделирование феррорезонанса с учетом инерционных свойств нелинейной индуктивности</i>	205
<i>Карпилов И.Д., Мустафин Р.М., Брагин Д.М., Попов А.И., Еремин А.В. Повышение эффективности работы абсорбционного реактора за счет улучшения его гидродинамических характеристик</i>	218

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

<i>Правила для авторов</i>	230
----------------------------	-----

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the 65th
anniversary of the first human
spaceflight

Series G: Technical sciences

№ 2/2026

CONTENTS

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Pometun E.D. Information-measuring system for assessing the biomechanical strength of a tree* 5
- Panarin V.M., Ryleeva E.M., Maslova A.A. Constructing an information and measurement system for monitoring water pollution fields in industrially developed areas* 14
- Fedorov S.A., Bezus A.V., Bezus I.U.A. Natural optical activity of non-ideal superlattices with stereoisomeric impurity layers* 23
- Kazakov V.V., Karpovskii A.IU., Dovgan A.IU. Method for calculating the distance from a rotated object to the boundaries of a limited space* 30

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

- Fediaev O.I., Sukhanov A.A. Research on the quality of neural network recognition of students entering the classroom by simulating a video stream of facial images from a database* 43
- Tretiakov I.A., Danilov V.V., Podlesnyi V.IU., Kolesnik E.V. Evaluation of the effectiveness of adaptive and cyclic data collection systems in IMS ACS and ASRS* 58
- Zviagintseva A.V., Brazhnikov A.R. Integral indicator of information complexity of multidimensional systems based on JS-divergence and structural distance* 69
- Nedoedko A.O., Sukhorukov S.I. Automation of assembly of aircraft doors using a robotic complex* 86
- Strizhko M.A., CHervinskii V.V. Automatic control module for additional traffic light phases for intelligent regulation of traffic flows at intersections* 100
- Babicheva M.V. Analysis of LLM05 vulnerability (improper output handling)* 108
- Ponomarev D.S. Comparative analysis of hybrid architectures AE-LSTM and AE-TRANSFORMER using the example of forecasting the monthly output volume of woodworking production* 115

<i>Ustenko V.IU., Pikalev IA.S. Study of selective augmentation strategies for semantic segmentation of UAV aerial imagery</i>	127
--	-----

ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Zakharov A.S., Aetov A.U., Saliakhov R.KH., Gilmutdinov I.M. Numerical modeling of heat transfer in air gas cooling devices taking into account the influence of external effects</i>	141
<i>Goroshkov V.A., Korovkin N.V., Grishentsev A.IU., Gerasimov I.V., Wenlong Y., Kasianov A.V. Method for identifying currents in overhead line conductors based on magnetic field sensor data</i>	159
<i>Kopeika D.V., Biriukov A.B. Analysis of the actual thermal performance of building envelopes in buildings of various types</i>	176
<i>Paskar I.N., Kudriashov D.S. Grid constraints and ways to improve the reliability of the Kuzbass power system</i>	183
<i>Kozhukhov N.N., Nadeev A.A., Prutskikh D.A., Dubanin V.IU., Naumov A.M. Numerical simulation of the aerodynamics of an immersible heat exchange element with ring tubes</i>	198
<i>Saifutdinov R.KH. Simulation of ferroresonance with consideration of inertial properties of nonlinear inductance</i>	205
<i>Karpilov I.D., Mustafin R.M., Bragin D.M., Popov A.I., Eremin A.V. Increasing the efficiency of an absorption reactor by improving its hydrodynamic characteristics</i>	218

INFORMATION SECTION

<i>Instructions for authors</i>	230
---------------------------------	-----

Э Л Е К Т Р О Н И К А , Ф О Т О Н И К А ,
П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е И С В Я З Ъ

EDN YLSMWJ
УДК 681.518.3

DOI 10.5281/zenodo.20799745

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ
БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕРЕВА

© 2026 Пометун Е.Д.

В работе представлена концепция информационно-измерительной системы (ИИС) для количественной оценки ветровой устойчивости деревьев. Система базируется на интегративном биомеханическом признаке надежности против воздействия ветра. Предлагаемый подход позволяет оценивать критическую нагрузку по её колебательным характеристикам, что открывает перспективы для мониторинга состояния древесных насаждений в условиях городской среды и лесных экосистем.

Ключевые слова: биомеханика деревьев, информационно-измерительная система, ветровая нагрузка, надежность против ветра.

Введение. Экобиомеханика как междисциплинарное направление рассматривает древесное растение как сложную биомеханическую систему, адаптированную к внешним нагрузкам в процессе роста. При этом одним из наиболее значимых внешних факторов, определяющих механическую эволюцию дерева, является ветер. Ветровые нагрузки формируют архитектуру кроны, влияют на распределение биомассы и, в конечном счёте, определяют прочностные характеристики древесных тканей [1, 2].

Одной из ключевых задач современной экологии и лесного хозяйства является прогнозирование механической устойчивости деревьев к экстремальным ветровым воздействиям. В качестве количественной меры устойчивости к ветровой нагрузке используется коэффициент надёжности SF (запас прочности), который представляет собой отношение предельной несущей способности дерева (критической нагрузки) к воздействующей ветровой нагрузке. Чем выше значение этого коэффициента, тем большим запасом прочности обладает дерево и ниже вероятность его повреждения.

В данной работе предлагается подход к оценке биомеханической прочности дерева, основанный на аэродинамических испытаниях в контролируемых условиях. В основе метода лежит гипотеза о том, что, в силу геометрического подобия ветви и целого растения, динамический отклик образца на воздействие воздушного потока является интегральным индикатором упруго-прочностных характеристик дерева.

Основная часть. Современные методы оценки механических свойств древесных растений делятся на две группы: деструктивные и неразрушающие. Деструктивные методы предполагают извлечение керны с помощью возрастного бура с последующим механическим испытанием образца на специальном оборудовании [3]. Неразрушающие методы включают акустическое зондирование, ультразвуковую диагностику и методы, основанные на измерении потенциала разности в ксилеме ствола [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (номер госрегистрации 124051400023-4).

Особый интерес представляют методы, основанные на анализе колебательных характеристик дерева. Акселерометрические измерения и анализ вынужденных колебаний позволяют оценивать динамические характеристики дерева в полевых условиях [5]. Однако такие измерения требуют сложной интерпретации и не всегда дают возможность выделить вклад отдельных элементов кроны.

С целью определения признака ветроустойчивости на уровне отдельного дерева, независимого от условий внешней среды, в работах [6, 7] предложено оценивать устойчивость (сопротивление) ствола ветровому воздействию посредством индекса SW (Safety against Wind [Н/м²]). Индекс SW представляет собой показатель сопротивления ствола ветровым нагрузкам, определяемый как критическое давление, при котором происходит разрушение (излом) ствола:

$$SW = \rho_{\text{возд}} \cdot g \cdot U_{\text{крит}}^2, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{возд}}$ - плотность воздуха (кг/м³); g - ускорение свободного падения (м/с²); $U_{\text{крит}}$ - критическая скорость ветра (м/с), вызывающая разрушение.

Данный индекс является интегративной характеристикой, объединяющей геометрические параметры ствола (диаметр, форма поперечного сечения), механические свойства древесины (предел прочности) и парусность кроны.

Для количественной оценки индекса SW в работах [8, 9] предложен ряд механистических моделей, реализация которых включает следующие последовательные этапы:

- 1) расчёт силы лобового сопротивления на основе анализа взаимодействия ветрового потока с параметрами кроны;
- 2) пересчёт данной силы в изгибающие моменты с учётом плеча рычага для произвольного поперечного сечения ствола;
- 3) распределение изгибающих моментов по площади поперечного сечения древесины с получением локальных изгибающих напряжений (сил на единицу площади);
- 4) сравнение расчётных ветровых напряжений с предельной несущей способностью материала - максимально допустимым напряжением, или прочностью древесины.

В рамках механики деформируемого твёрдого тела индекс SW (1) может быть количественно выражен через напряжения, возникающие в поперечном сечении ствола:

$$SW = \sigma_{\text{пред}} - \sigma_{\text{расч}},$$

где $\sigma_{\text{пред}}$ - предельное напряжение (прочность) древесины на изгиб, определяемое её физико-механическими свойствами [Н/м²].; $\sigma_{\text{расч}}$ - расчётное изгибающее напряжение, индуцированное фактической ветровой нагрузкой [Н/м²].

Положительное значение $SW > 0$ указывает на наличие запаса прочности, $SW = 0$ соответствует достижению предела несущей способности, а $SW < 0$ свидетельствует о том, что действующие напряжения превышают прочность материала, что неизбежно ведёт к разрушению.

Т.о., разрушение стебля наступает в том случае, если возникающие в нем изгибающие напряжения превышают предел прочности древесины. При обратном соотношении, когда напряжения остаются в допустимых пределах, целостность структуры сохраняется. Следовательно, предельно допустимое (критическое) ветровое

давление соответствует такому внешнему воздействию, при котором изгибающие напряжения достигают своего максимального значения, равного пределу прочности [10-12].

На основе показателя SW вычисляется стандартный безразмерный коэффициент надёжности SF (Safety Factor) как отношение индекса SW (1) к фактическому давлению ветрового сопротивления, обусловленному конкретным ветровым климатом:

$$SF = \frac{SW}{P_{\text{факт}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{факт}}$ - фактическое динамическое давление ветра.

Значение $SF > 1$ свидетельствует о наличии запаса прочности, $SF = 1$ соответствует предельному состоянию, а $SF < 1$ указывает на превышение нагрузки несущей способностью и высокий риск повреждения дерева. Таким образом, SF является относительным показателем, зависящим от внешних условий.

Таким образом, индекс SW является внутренней характеристикой дерева, тогда как SF представляет собой интегральный показатель риска, учитывающий как свойства самого дерева, так и внешние факторы. Именно SF является конечным параметром, позволяющим оценить фактическую безопасность дерева в конкретных условиях произрастания.

Метод оценки биомеханической прочности дерева, предложенный в данной работе, предполагает аэродинамические испытания ветви, рассматриваемой в качестве геометрически подобной модели дерева, с одновременной высокоточной регистрацией параметров воздушного потока и последующей математической обработкой данных.

Ветвь рассматривается как упругий стержень переменного поперечного сечения, закреплённый в основании (место крепления к стволу или материнской ветви) и свободный на противоположном конце. Длина ветки l вдоль оси z от места крепления (продольная координата). Поперечное сечение принимается круглым с диаметром $d(z)$, который в общем случае является функцией продольной координаты. Такой выбор модели обусловлен тем, что ветвь сохраняет все ключевые механические, аэродинамические и теплофизические свойства целого дерева, характер взаимодействия с набегающим потоком. При соблюдении условий геометрического подобия и равенства скоростей обдува теория подобия гарантирует равенство напряжений в модели и натуре ($\sigma_p = k_\sigma \sigma_m$, где k_σ - масштабный коэффициент), что позволяет переносить результаты лабораторных испытаний на реальное дерево.

Выбор модели упругого стержня (ветви) основывается на следующих допущениях:

- ветка работает преимущественно на поперечный изгиб под действием распределённой аэродинамической нагрузки, направленной нормально к её оси;
- деформациями сдвига и кручения можно пренебречь ввиду их малости по сравнению с изгибными (соотношение длины к поперечному размеру $l/d \gg 10$, что позволяет использовать теорию Бернулли-Эйлера);
- материал ветки - древесина - считается линейно-упругим, изотропным в плоскости поперечного сечения, с постоянным модулем упругости E (вдоль волокон анизотропия проявляется, однако для изгиба в радиальном направлении используется эффективное значение E , определяемое по калибровочным кривым);
- плотность древесины ρ_w принимается известной (задаётся по справочным данным для породы дерева);

- поперечное сечение ветви является постоянным ($d(z)=d_0=const$).

Листовой аппарат создаёт дополнительную парусность, которая увеличивает аэродинамическую нагрузку и смещает центр давления. Для её учёта вводится эффективная площадь сопротивления на единицу длины $A_{eff}(z)$, определяемая как проекция всех элементов ветви (основного ствола, боковых побегов, листьев) на плоскость, нормальную к направлению набегающего потока.

При установившемся обтекании ветви воздушным потоком с локальной скоростью потока воздуха $V(z)$ поле скоростей принимается однородным: $V(z) \equiv V$ элементарную силу лобового сопротивления, действующую на участок длиной dz , запишем в виде:

$$q(z) = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D(z) A_{eff}(z), \quad (3)$$

где ρ - плотность воздуха (при стандартных атмосферных условиях $\rho_a \approx 1.225 \text{ кг/м}^3$);

$C_D(z)$ - безразмерный коэффициент лобового сопротивления, который для тел с шероховатой поверхностью и наличием листы в автомоделной области чисел Рейнольдса ($Re > 10^4$) может считаться постоянным: $C_D \approx 1.2 \div 1.3$ [13];

$A_{eff}(z)$ – эффективная площадь, определяемая через геометрические параметры:

$$A_{eff}(z) = d(z)(1 - \phi) + A_{лист}(z)\eta,$$

где ϕ - коэффициент пористости (доля площади, сквозь которую воздух проходит без сопротивления, для голых веток $\phi = 0$); $A_{лист}$ - проекция листовой поверхности i -го яруса на вертикальную плоскость, отнесённая к единице длины; η - коэффициент проницаемости листы ($0 < \eta < 1$).

В реальных условиях поток воздуха является турбулентным. При турбулентном потоке мгновенная скорость определяется по выражению [14]:

$$V(t) = \bar{V} + v'(t),$$

где $\bar{V}$ - среднее значение скорости; $v'(t)$ - пульсационная составляющая.

В расчёте на прочность используется пиковое значение скорости:

$$V_{max} = \bar{V} + 3\sigma_v,$$

где σ_v - среднеквадратичное отклонение пульсаций, измеряемое термоанемометром.

Соответственно, максимальная распределённая нагрузка (3) определяется как:

$$q(z) = \frac{1}{2} \rho C_D A_{eff}(z) V_{max}^2.$$

Для оценки биомеханической прочности натурального дерева ствол моделируется как консольная балка, закреплённая в основании. Уравнение Бернулли–Эйлера связывает прогиб $w(z)$ с распределённой ветровой нагрузкой $q(z)$:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(EI(z) \frac{d^2 w}{dz^2} \right) = q(z), \quad (4)$$

где E - модуль упругости древесины; $I(z)$ - момент инерции поперечного сечения (для

круга $I = \frac{\pi d^4}{65}$), а z - высота.

Дважды интегрируя уравнение (4) с граничными условиями для защемлённой консоли ($w(0) = 0$, $w'(0) = 0$, $M(L) = 0$, $Q(L) = 0$), найдем изгибающий момент $M(z)$ и напряжение в опасном сечении $\sigma_{max} = \frac{M(z)}{W(z)} = \frac{q_0 L^2}{2W}$, где $W = \frac{\pi d^3}{32}$ - момент сопротивления [15]. Интегративный показатель $SW(1)$ запишем в виде:

$$SW = P_{krit} = \frac{2\sigma_{пред} W}{C_D A_{eff} L^2}.$$

Фактический коэффициент надежности (2), с учетом максимального напряжения σ_{max} в основании и предела прочности $\sigma_{пред}$, запишем в виде:

$$SF = \frac{\sigma_{пред}}{\sigma_{max}},$$

где σ_{max} - максимальное расчётное напряжение, вызванное внешней ветровой нагрузкой в сечении ствола у его основания.

Этот метод широко применяется для расчёта ветровой нагрузки и оценки риска ветровала [7, 8].

На сегодняшний день оценка биомеханических свойств древесных растений сталкивается с рядом системных ограничений, которые и определяют необходимость в создании информационно-измерительной системы, позволяющей в полевых условиях оперативно и с достаточной точностью оценивать интегративный признак надежности против ветра.

ИИС для оценки биомеханической прочности дерева включает три основных функциональных модуля:

1. Модуль управления аэродинамическим стендом.

Данный модуль обеспечивает задание и стабилизацию параметров воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы. Управление осуществляется через систему автоматического регулирования частоты вращения вентилятора. Основными контролируемыми параметрами являются скорость (в диапазоне от 0 до 40 м/с) и температура потока (в диапазоне от комнатной до 40 °С).

2. Измерительный модуль.

Измерительный модуль включает в себя: термоанемометр постоянной температуры, термометр, цифровой датчик давления, тензодатчик.

Термоанемометр является ключевым элементом системы. Его основная функция - измерение скорости и турбулентности воздушного потока в непосредственной близости от поверхности испытуемого образца.

Термометр предназначен для измерения температуры поверхности образца в процессе аэродинамического испытания. Используются как контактные (термопары, термисторы), так и бесконтактные (инфракрасные пирометры) датчики.

Цифровой датчик давления типа Сапфир 22ДД с микротрубкой Пито-Прандтля позволяет контролировать среднюю скорость потока в рабочей части аэродинамической трубы.

Тензометрический модуль позволяет измерить деформацию ветки под воздействием ветровой нагрузки, что необходимо для расчёта изгибающих моментов и, в конечном счёте, показателей надёжности SW и SF.

3. Программный модуль для сбора, обработки и визуализации данных.

Схема разработанной ИИС приведена на рисунке 1.

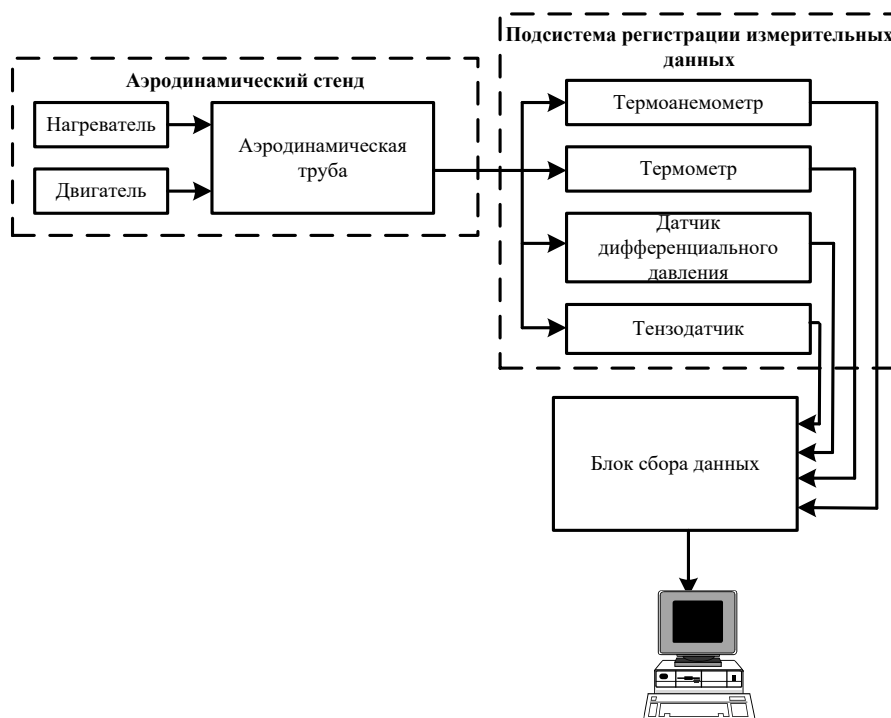


Рис. 1. Схема ИИС для оценки биомеханической прочности дерева

Принципиальная схема размещения образцов ветвей на стенде показана на рис. 2. Испытания проводятся на аэродинамическом стенде АДС 200/250 с трубой замкнутого типа с открытой рабочей частью. Рабочая часть такой трубы представляет собой участок свободной турбулентной струи длиной до 700 см при диаметре сопла 200 мм, что позволяет испытывать образцы определенных размеров. Максимальная скорость потока достигает до 40 м/с, что обеспечивает широкий диапазон режимов обдува образцов.

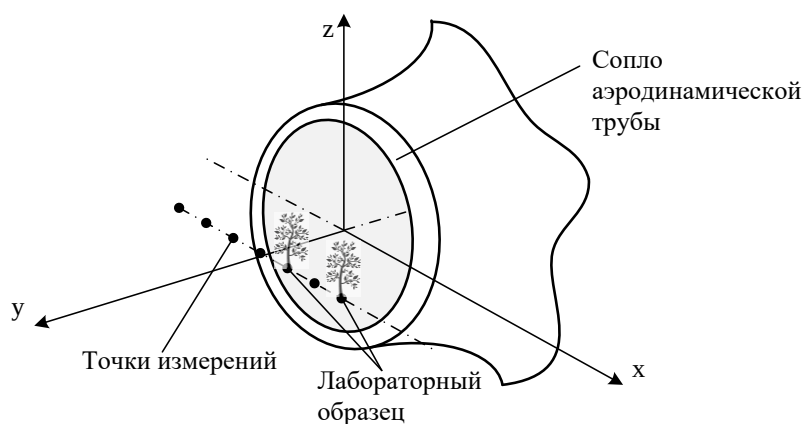


Рис. 2. Схема размещения лабораторных образцов ветвей дерева в рабочей части аэродинамической трубы

Использование аэродинамического стенда позволяет выполнять экспериментальные исследования в строго контролируемых условиях.

Следует подчеркнуть, что работа носит методологический характер, представленная ИИС является теоретически обоснованным проектом, требующим последующей экспериментальной апробации.

Выводы. Разработанная информационно – измерительная система на базе аэродинамического стенда позволяет по измеренным характеристикам оценивать модуль упругости и критическую нагрузку ветви, что создает основу для количественного мониторинга биомеханической прочности деревьев в контролируемых аэродинамических условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Korniyenko, V. O. Impact of natural climate factors on mechanical stability and failure rate in silver birch trees / V. O. Korniyenko, V. N. Kalaev // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2022. – Vol. 15, No. 7. – P. 806–816. – DOI 10.1134/S1995425522070150.
2. Корниенко, В. О. Экологическое значение биомеханических свойств древесных растений на примере *Juniperus virginiana* L / В. О. Корниенко, В. Н. Калаев // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. – 2018. – № 1. – С. 97-103. – EDN UORZMG.
3. Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength / M. Fournier, J. Dlouha, G. Jaouen, T. Almeras // *Journal of Experimental Botany*. – 2013. – Vol. 64, No. 15. – P. 4793–4815. – DOI 10.1093/jxb/ert279.
4. Камалова, Н. С. Перспективы использования цифровых датчиков для мониторинга состояния древесных растений / Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова, Ю. В. Крутских // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 1–8.
5. Стрельников, И. И. Разработка прибора для измерения параметров колебаний ствола древесных растений / И. И. Стрельников, К. В. Мудрецова // *Экология родного края: проблемы и пути их решения : Материалы XV Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, Киров, 18 мая 2020 года. Том Книга 2*. – Киров: Вятский государственный университет, 2020. – С. 140-144. – EDN ABTQCD.
6. Schindler, D. Wind effects on trees / D. Schindler, J. Bauhus, H. Mayer // *European Journal of Forest Research*. – 2012. – Vol. 131, No. 1. – P. 159–163. – DOI 10.1007/s10342-011-0576-x.
7. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests / B. Gardiner, K. Byrne, S. Hale [et al] // *Forestry*. – 2008. – Vol. 81, No. 3. – P. 447–463. – DOI 10.1093/forestry/cpn022.
8. Potentials of the evaluation of the wood quality in living trees by using semi- and non-destructive methods in order to reduce wood-processing costs / I. Zivanovic, Z. Poduska, Lj. Rakonjac, F. Jovanovic // *Sustainable Forestry: Collection*. – 2019. – No. 79-80. – P. 115-126.
9. Wind tunnel simulation of complex deformation law on retaining wall under aeolian sand environment / Min Yan, Zuo Hejun, Guo Yue [et al] // *Journal of Beijing Forestry University*. – 2021. – Vol. 43, No. 5. – P. 108–117. – DOI 10.12171/j.1000-1522.20200339.
10. Захаров, Ю. В. Модели устойчивости деревьев и насаждений к воздействию ветра / Ю. В. Захаров, В. Г. Суховольский // *Лесоведение*. – 2004. – № 2. – С. 61-67. – EDN OUWLLL.
11. Влияние ветровой нагрузки на образование пороков в растущих деревьях / О. И. Григорьева, И. В. Григорьев, А. Б. Давтян [и др.] // *Системы. Методы. Технологии*. – 2021. – № 2(50). – С. 63-69. – DOI 10.18324/2077-5415-2021-2-63-69. – EDN UQWSSX.
12. Моделирование критических локальных деформаций коры растущего дерева при ветровой нагрузке / Г. Н. Колесников, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2022. – № 5. – С. 100–113. – DOI 10.37482/0536-1036-2022-5-100-113.
13. Ishikawa, Y. Effect of density of trees on drag exerted on trees in river channels / Y. Ishikawa, K. Mizuhara, S. Ashida // *Journal of Forest Research*. – 2000. – Vol. 5, No. 4. – P. 271–279. – DOI 10.1007/BF02767121.
14. Процедура восстановления непрерывных сообщений в измерительных процессах в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, И. А. Третьяков, В. В. Данилов [и др.] // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. – 2025. – № 1. – С. 112-120. – DOI 10.5281/zenodo.15056709. – EDN MFJTTH.

15. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы измерения параметров турбулентности / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 20-25. – DOI 10.5281/zenodo.15056665. – EDN BEWEYW.

REFERENCES LIST

1. Korniyenko, V. O. Impact of natural climate factors on mechanical stability and failure rate in silver birch trees / V. O. Korniyenko, V. N. Kalaev // Contemporary Problems of Ecology. – 2022. – Vol. 15, No. 7. – P. 806–816. – DOI 10.1134/S1995425522070150.
2. Kornienko, V. O. Ekologicheskoe znachenie biomekhanicheskikh svoystv drevesnykh rastenii na primere *Juniperus virginiana* L / V. O. Kornienko, V. N. Kalaev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiia. Biologiia. Farmatsiia. – 2018. – № 1. – S. 97-103. – EDN UORZMG.
3. Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength / M. Fournier, J. Dlouha, G. Jaouen, T. Almeras // Journal of Experimental Botany. – 2013. – Vol. 64, No. 15. – P. 4793–4815. – DOI 10.1093/jxb/ert279.
4. Kamalova, N. S. Perspektivy ispolzovaniia tsifrovyykh datchikov dlia monitoringa sostoiianiia drevesnykh rastenii / N. S. Kamalova, N. Iu. Evsikova, Iu. V. Krutskikh // Vestnik nauki i obrazovaniia Severo-Zapada Rossii. – 2022. – T. 8, № 1. – S. 1–8.
5. Strelnikov, I. I. Razrabotka pribora dlia izmereniia parametrov kolebani stvola drevesnykh rastenii / I. I. Strelnikov, K. V. Mudretsova // Ekologiia rodnogo kraia: problemy i puti ikh resheniia : Materialy XV Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii, Kirov, 18 maia 2020 goda. Tom Kniga 2. – Kirov: Viatskii gosudarstvennyi universitet, 2020. – S. 140-144. – EDN ABTQCD.
6. Schindler, D. Wind effects on trees / D. Schindler, J. Bauhus, H. Mayer // European Journal of Forest Research. – 2012. – Vol. 131, No. 1. – P. 159–163. – DOI 10.1007/s10342-011-0576-x.
7. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests / B. Gardiner, K. Byrne, S. Hale [et al] // Forestry. – 2008. – Vol. 81, No. 3. – P. 447–463. – DOI 10.1093/forestry/cpn022.
8. Potentials of the evaluation of the wood quality in living trees by using semi- and non destructive methods in order to reduce wood processing costs / I. Zivanovic, Z. Poduska, Lj. Rakonjac, F. Jovanovic // Sustainable Forestry: Collection. – 2019. – No. 79 80. – P. 115 126.
9. Wind tunnel simulation of complex deformation law on retaining wall under aeolian sand environment / Min Yan, Zuo Hejun, Guo Yue [et al] // Journal of Beijing Forestry University. – 2021. – Vol. 43, No. 5. – P. 108–117. – DOI 10.12171/j.1000-1522.20200339.
10. Zakharov, Iu. V. Modeli ustoiichivosti derevev i nasazhdenii k vozddeistviu vetra / Iu. V. Zakharov, V. G. Sukhovolskii // Lesovedenie. – 2004. – № 2. – S. 61-67. – EDN OUWLLL.
11. Vliianie vetrovoi nagruzki na obrazovanie porokov v rastushchikh dereviakh / O. I. Grigoreva, I. V. Grigorev, A. B. Davtian [i dr.] // Sistemy. Metody. Tekhnologii. – 2021. – № 2(50). – S. 63-69. – DOI 10.18324/2077-5415-2021-2-63-69. – EDN UQWSSX.
12. Modelirovanie kriticheskikh lokalnykh deformatsii kory rastushchego dereva pri vetrovoi nagruzke / G. N. Kolesnikov, O. I. Grigoreva, I. V. Grigorev [i dr.] // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal. – 2022. – № 5. – S. 100–113. – DOI 10.37482/0536-1036-2022-5-100-113.
13. Ishikawa, Y. Effect of density of trees on drag exerted on trees in river channels / Y. Ishikawa, K. Mizuhara, S. Ashida // Journal of Forest Research. – 2000. – Vol. 5, No. 4. – P. 271–279. – DOI 10.1007/BF02767121.
14. Protsedura vosstanovleniia nepreryvnykh soobshchenii v izmeritelnykh protsessakh v ASU i ASNI / V. Iu. Podlesnyi, I. A. Tretiakov, V. V. Danilov [i dr.] // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 1. – S. 112-120. – DOI 10.5281/zenodo.15056709. – EDN MFJTTH.
15. Pomietun, E. D. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy izmereniia parametrov turbulentnosti / E. D. Pomietun, V. N. Lebedev // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 1. – S. 20-25. – DOI 10.5281/zenodo.15056665. – EDN BEWEYW.

Поступила в редакцию 25.02.2026 г., рекомендована к изданию 20.03.2026 г.

INFORMATION – MEASURING SYSTEM FOR ASSESSING THE BIOMECHANICAL STRENGTH
OF A TREE

Pometun E.D.

The paper presents the concept of an information and measurement system (IMS) for quantifying the wind resistance of trees. The system is based on an integrated biomechanical criterion of wind resistance reliability. The proposed approach allows for assessing the critical load by its oscillatory characteristics, which opens up prospects for monitoring the condition of tree plantations in urban environments and forest ecosystems.

Keywords: tree biomechanics, information and measurement system, wind load, wind resistance reliability.

Пометун Екатерина Дмитриевна

кандидат технических наук, доцент, и.о.
заведующего кафедрой физики неравновесных
процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: e.pometun.fnpme@mail.ru

Pometun Ekaterina Dmitrievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Acting Head of the Department of Physics of
Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology
named after I.L. Povkh of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1522-3517>

ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННО РАЗВИТЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2026 Панарин В.М., Рылеева Е.М., Маслова А.А.

В статье рассматривается комплексный методологический подход к построению информационно-измерительной системы (ИИС) контроля состояния поверхностных водных объектов в условиях высокой антропогенной нагрузки. В работе систематизированы и детализированы ключевые принципы построения таких систем: системность и комплексность, иерархичность, целевая ориентация, интеграция разнородных данных, адаптивность и интеллектуальный анализ. Особое внимание уделено специфике мониторинга приоритетных загрязнителей промышленного происхождения, методам пространственно-временного анализа данных и интеграции с системами поддержки принятия решений.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, контроль водных объектов, поле загрязнения, качество воды, промышленная территория, датчики, беспроводные сенсорные сети, геоинформационные системы.

Введение. Промышленно развитые территории (ПРТ) являются источником комплексного антропогенного воздействия на водные экосистемы. Специфика загрязнения обусловлена многообразием отраслей промышленности (металлургическая, химическая, текстильная, целлюлозно-бумажная), каждая из которой формирует уникальный спектр загрязняющих веществ: от классических тяжёлых металлов до специфических органических ксенобиотиков [1]. Традиционные методы мониторинга, основанные на эпизодическом отборе проб в фиксированных створах и последующего и лабораторного анализа, не позволяют в полной мере оценить динамику и структуру поля загрязнения (непрерывного распределения концентраций ЗВ в области, формируемой множеством точечных, рассредоточенных и диффузных источников [1]). Поэтому возникает необходимость в создании принципиально новых инструментальных и методологических решений.

Информационно-измерительная система (ИИС) контроля представляет собой целостный технологический комплекс, обеспечивающий автоматизированный сбор, передачу, обработку, хранение и визуализацию данных о состоянии водных объектов в режиме, близком к реальному времени. Построение такой системы для ПРТ требует учёта повышенных рисков, сложной пространственной структуры источников эмиссии и необходимости прогнозирования аварийных ситуаций.

Исследование направлено на систематизацию принципов построения и описание универсальной модульной структуры интегрированных ИИС, адаптируемых к условиям конкретных промышленных территорий и способных обеспечить комплексный контроль, анализ и прогноз состояния водных экосистем в режиме, близком к реальному времени.

Построение информационно-измерительной системы (ИИС) для контроля полей загрязнения водных объектов промышленно развитых территорий базируется на:

- систематизации принципов построения ИИС с учётом специфики промышленно развитых территорий (адаптивность, иерархичность, многопараметричность, метрологическая надёжность, открытость и

масштабируемость), что позволяет формировать непрерывные пространственно-временные поля загрязнения, а не только фиксировать точечные превышения;

- разработанной универсальной четырёхуровневой модульной архитектуре, интегрирующей измерительный (сенсорный), коммуникационный, платформенный и пользовательский уровни, которая в отличие от существующих подходов специально адаптирована для условий множественных и разнородных источников загрязнения, характерных для ПРТ и обеспечивает возможность оперативного реагирования на аварийные ситуации;

- введении классификации приоритетных загрязнителей и методов их детектирования в составе ИИС, учитывающей региональную промышленную специфику и современные сенсорные технологии, включая оптические, электрохимические и биоиндикационные методы.

Фундаментальные принципы построения ИИС для промышленных территорий. Разработка информационно-измерительной системы (ИИС) для контроля водных объектов в условиях промышленно развитых территорий представляет собой комплексную инженерно-экологическую задачу. Специфика водной среды, как объекта мониторинга, подверженного многофакторному и динамичному влиянию со стороны разнообразных технологических процессов, предъявляет исключительные требования к архитектуре системы. Принципы построения такой ИИС не являются произвольным набором технических требований. Они формируют методологический каркас, производный от двух ключевых групп факторов:

- природа и характер экологических угроз, которые необходимо определять, измерять и прогнозировать (спектр загрязнителей, пространственно-временная изменчивость, риск аварийных ситуаций);

- критерии эффективности и надежности самой измерительной инфраструктуры в сложных, зачастую агрессивных, условиях эксплуатации.

Соблюдение этих принципов обеспечивает трансформацию ИИС из набора разрозненных датчиков в целостную систему, способную генерировать информацию, адекватную для принятия упреждающих и оперативных управленческих решений. Систематизируем основные фундаментальные принципы подобной интеллектуальной системы контроля:

1. Принцип репрезентативности и достаточности. Сеть измерительных постов должна охватывать все типы водных объектов (реки, озёра, пруды-накопители), ключевые контрольные створы (выше и ниже сбросов, в зонах смешения, у водозаборов) и обеспечивать выявление пространственных градиентов загрязнения.

2. Принцип приоритетности контролируемых параметров. Номенклатура измеряемых показателей должна определяться исходя из специфики местной промышленности. Например, для районов цветной металлургии обязателен мониторинг ионов Cu, Zn, Cd, Pb; для химических комплексов – нитросоединений, фенолов, СПАВ [2].

3. Принцип адекватности технологий измерения. Для базовых физико-химических показателей (рН, электропроводность, растворённый кислород) применяются проверенные электрохимические и оптические сенсоры. Для определения специфических загрязнителей необходима комбинация методов, то есть использование ионоселективных электродов, а в точках ключевого контроля – автоматизированных анализаторов или отбора проб для последующего анализа в аккредитованной лаборатории [3].

4. Принцип автономности и надёжности. Полевое оборудование должно функционировать длительное время в условиях агрессивной среды, перепадов температур, возможного биообрастания, поэтому критически важна организация бесперебойного энергоснабжения, чаще всего на основе гибридных систем (солнечные панели и аккумуляторы).

5. Принцип интеллектуальной обработки данных. ИИС должна не просто архивировать данные, но и выявлять аномалии, тренды, строить прогностические модели распространения загрязнений на основе гидродинамических расчётов.

Вышеперечисленные фундаментальные принципы носят практико-ориентированный характер. Они служат непосредственными технико-экономическими требованиями на стадии проектирования, определяя выбор технологий, архитектурные решения и конфигурацию каждого уровня системы. Реализация этих принципов находит свое конкретное воплощение в многоуровневой модульной структуре ИИС, где каждый компонент выполняет строго определенную функцию в общей цепочке от измерения параметра до формирования управленческого решения. Таким образом, принципы построения напрямую диктуют структуру системы.

Структура и компоненты ИИС контроля полей загрязнения водных объектов промышленно развитых территорий. Иерархичность пространственной сети наблюдений выступает логическим продолжением системного комплексного подхода. Многоуровневая схема построения сети позволяет дифференцировать детализацию данных в зависимости от степени антропогенной нагрузки, акцентирует внимание на зонах максимального негативного воздействия и одновременно отображает общую картину состояния поверхностного водного объекта. Архитектура ИИС контроля полей загрязнения водных объектов промышленно развитых территорий представлена на рисунке 1.

Рассмотрим подробнее каждый из уровней.

Уровень 1 – измерительный (сенсорный) уровень – состоит из распределённой сети автономных измерительных комплексов (буи, стационарные станции (посты мониторинга), погружные зонды), причем каждый комплекс включает:

- набор датчиков или модулей для измерения базовых (термометр, кондуктометр, рН-метр, оксиметр, турбидиметр) и специфических параметров;
- контроллер – микропроцессорное устройство (на базе Arduino, Raspberry Pi или промышленных PLC) для управления датчиками, первичной обработки сигналов (фильтрация, усреднение) и кодирования данных;
- модуль связи, который передаёт данные на верхний уровень, причем выбор технологии зависит от существующих условий (GSM/3G/4G/5G для урбанизированных районов; LPWAN-технологии (LoRaWAN, NB-IoT) для удалённых объектов с низким энергопотреблением, в некоторых случаях – спутниковая связь [4]);
- модуль пробоотбора и консервации – автоматический пробоотборник, активируемый по сигналу контроллера при превышении пороговых значений.

Описанная конфигурация нижнего уровня позволяет формировать распределённую сеть точек контроля, функционирующих в автономном режиме. Однако эффективность мониторинга достигается только при условии своевременной доставки измерительной информации от удалённых комплексов в центр обработки. Поскольку измерительные посты часто территориально разобщены и находятся в сложных условиях эксплуатации (от городских коллекторов до труднодоступных акваторий), возникает необходимость в построении надёжной и помехоустойчивой

телекоммуникационной инфраструктуры. Именно эту задачу решает следующий иерархический уровень системы.

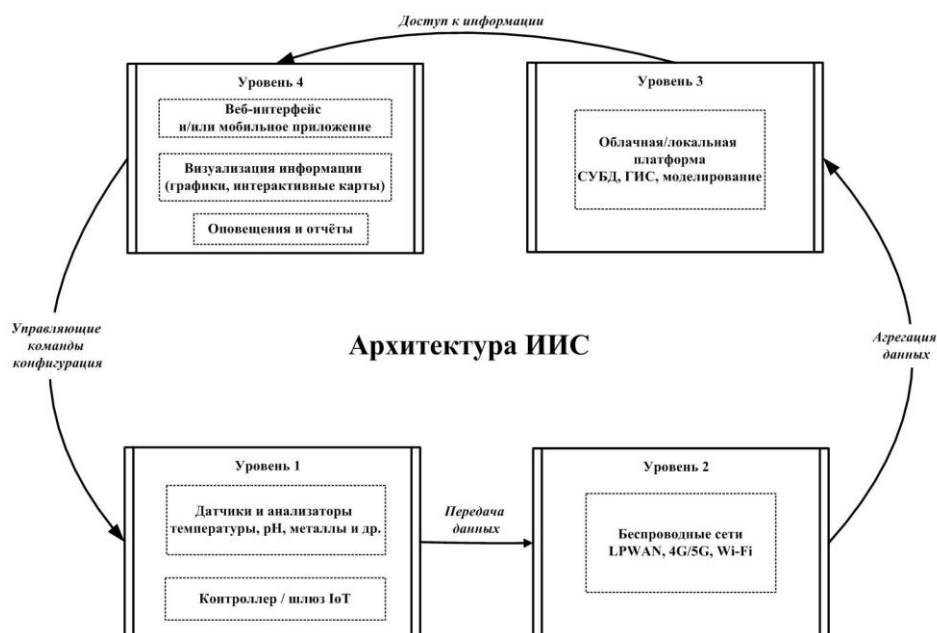


Рис. 1. Архитектура ИИС контроля полей загрязнения водных объектов промышленно развитых территорий

Уровень 2 – уровень передачи данных – обеспечивает транспортировку информации от полевых устройств к центру обработки данных (ЦОД). Включает шлюзы, маршрутизаторы, сотовые или радиомодемы, причем рекомендуется использовать защищённые протоколы для минимизации потерь и обеспечения безопасности данных. Благодаря функционированию данного уровня осуществляется непрерывный поток измерительной информации от территориально распределённых постов в безопасной и устойчивой к помехам среде. Однако доставка данных произведенных замеров является лишь промежуточной задачей. Для превращения этих массивов в полезную информацию, пригодную для анализа экологической обстановки, выявления трендов и принятия управленческих решений, необходима дальнейшая централизованная обработка. Эту функцию берёт на себя верхний уровень системы, где данные проходят через этапы валидации, структурирования и интерпретации.

Уровень 3 – платформенный (серверный) уровень – формируется на локальном сервере или в облачной инфраструктуре и выполняет следующие ключевые функции:

- приём и первичное хранение данных (создаются базы данных временных рядов);
- верификация и калибровка данных (производится автоматическое выявление и маркировка аномальных значений, программная корректировка чувствительности датчиков);
- агрегация и аналитическая обработка (рассчитываются производные индексов загрязнения воды, делается статистический анализ и подключается машинное обучение для прогнозирования);
- интеграция с геоинформационными системами (ГИС) (вводится пространственная привязка данных, интерполяция для построения карт полей загрязнения методами кригинга и обратных взвешенных расстояний (позволяет

рассчитать значение каждой ячейки раstra, усредняя значения опорных точек в заданной окрестности данной ячейки), наложение слоёв источников сбросов, гидрографии и особо охраняемых природных территорий [5]).

В процессе функционирования выше обозначенного уровня большие массивы измерений преобразуются в структурированную, верифицированную и пространственно привязанную информацию. Построенные на основе методов геостатистики карты полей загрязнения и прогнозные модели, рассчитанные с применением алгоритмов машинного обучения, создают информационную основу для объективной оценки состояния водных объектов. Однако конечная ценность системы определяется тем, насколько оперативно и полно эта информация может быть использована специалистами, принимающими решения, и другими заинтересованными сторонами. Для этого вводится специальный уровень 4, обеспечивающий визуализацию данных и интерактивное взаимодействие с системой в соответствии с различными компетенциями и задачами пользователей [6-9].

Уровень 4 – уровень визуализации данных (веб-интерфейс и/или мобильное приложение для визуализации информации в виде дашбордов, графиков, интерактивных карт) обеспечивает:

- контроля качества поверхностных вод в реальном времени;
- изменение конфигурации системы посредством удалённой настройки порогов, частоты опроса датчиков;
- генерацию отчётов и оповещений посредством автоматического уведомления (SMS, e-mail) при аварийных ситуациях, формирование регламентных отчётов для надзорных органов.

Таким образом, данный уровень обеспечивает доступ к результатам контроля в формате, максимально адаптированном для принятия решений: от наглядных графиков трендов до сигналов тревоги при аварийных сбросах. Однако информативность и достоверность визуализируемых данных напрямую зависят от того, насколько корректно подобран перечень контролируемых показателей и выбраны методы их измерения на нижних уровнях системы. В связи с этим принципиальное значение приобретает метрологическое обеспечение ИИС.

Возможность обеспечения единства измерений заложена в самой структуре системы. На сенсорном уровне предполагается использование средств измерений утверждённых типов, проходящих регулярную поверку, что гарантирует сопоставление результатов с государственными эталонами. На уровне передачи и хранения данных контролируется целостность информации. На аналитическом уровне заложены алгоритмы верификации и внутрилабораторного контроля качества, включая автоматическую фильтрацию, контроль сходимости и стабильности градуировки. В качестве нормативной базы при проектировании такой ИИС следует руководствоваться, в первую очередь, положениями Федерального закона № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», ГОСТ 27384-2002 «Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств», ГОСТ Р 8.589-2001 «Контроль загрязнения окружающей природной среды. Метрологическое обеспечение», а также ведомственными методиками. Сами значения пределов погрешности строго дифференцированы в зависимости от измеряемого показателя и диапазона концентраций. Например, для водородного показателя абсолютная погрешность не должна превышать 0,2 ед. pH, для биохимического потребления кислорода в диапазоне 1–100 мгО₂/дм³ – 40%, а для нефтепродуктов в низких концентрациях – до 60%. При этом необходимо чётко понимать, что предложенная архитектура ИИС не подменяет

собой метрологическую аттестацию, а создаёт техническую основу для её реализации, включая автоматическое протоколирование и возможность интеграции с аккредитованными лабораториями для выборочного контроля.

Возвращаясь к выбору конкретных показателей и методов детектирования, отметим: в условиях промышленно развитых территорий (ПРТ) спектр потенциальных загрязнителей чрезвычайно широк, что требует их систематизации и определения приоритетных групп веществ, подлежащих автоматическому контролю. Классификация таких загрязнителей, а также современные методы их детектирования, интегрируемые в состав ИИС, представлены в таблице 1.

Выбор конкретных методов детектирования определяется преобладающим типом промышленности региона, требованиями природоохранного законодательства и экономической целесообразностью. Таким образом, аппаратная база ИИС, включающая сенсорное оборудование, коммуникационные модули и серверные мощности, создаёт основу для сбора первичной информации о состоянии водных объектов. Однако эффективность системы контроля определяется не только техническими характеристиками измерительных средств, но и глубиной аналитической обработки получаемых данных. Простые замеры загрязняющих веществ преобразуются в необходимую для принятия управленческих решений информацию лишь при наличии адекватного научно-методического аппарата и специализированного программного обеспечения, реализующего алгоритмы обработки, интерпретации и прогнозирования. Именно на этом этапе решаются задачи верификации данных, расчёта интегральных показателей качества воды, построения прогнозных моделей и пространственного анализа в среде ГИС.

Таблица 1. Классификация приоритетных загрязнителей водных объектов ПРТ и методы их детектирования в ИИС контроля полей загрязнения водных объектов промышленно развитых территорий

Группа загрязнителей	Приоритетные показатели	Типовые источники в ПРТ	Метод детектирования (сенсоры/анализаторы)	Особенности применения в ИИС
Гидрохимические показатели (базовые)	Температура, pH, электропроводность, растворенный кислород, мутность	Универсальные показатели состояния водной среды, все типы производств	Электрохимические ячейки, оптические датчики, терморезисторы	Обязательный минимум для всех постов, высокая надежность, не требуют частой калибровки
Биогенные элементы	Соединения азота (аммоний, нитраты, нитриты), фосфаты	Агропромышленные комплексы, коммунальные стоки, химические производства	Ионоселективные электроды (ИСЭ), фотометрические анализаторы (с реагентами)	ИСЭ требуют регулярной очистки и калибровки; фотометры — более точны, но сложны и дороги
Тяжелые металлы	Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Ni, Cr (общие и растворенные формы)	Металлургия, гальванические производства, горнодобывающая промышленность	Инверсионная вольтамперометрия (ИВ), спектрофотометрия (с предварительным концентрированием), рентгенофлуоресцентный анализ (для взвесей)	Высокая стоимость сенсоров, необходимость регенерации электродов, межкалибровочные интервалы ограничены

Нефтепродукты и органические соединения	Нефтепродукты (суммарно), фенолы, ПАУ, формальдегид, хлорорганические соединения	Нефтехимия, коксохимия, транспорт, ТЭЦ	Спектрофлуориметрия (лазерная/УФ-флуоресценция), ИК-спектроскопия, газоаналитические сенсоры (для летучих фракций)	Флуориметры — эффективны для нефтепродуктов, но чувствительны к обмрастанию; для специфических соединений — хроматографы (дорогие, их сложно автоматизировать)
Специфические поллютанты	Сульфиды, сульфаты, хлориды, цианиды, СПАВ, пестициды	Целлюлозно-бумажные комбинаты, горно-обогатительные фабрики, текстильная промышленность	ИСЭ (на Cl, CN), титраторы (на сульфиды), иммуноферментные сенсоры (на пестициды), УФ-спектрометрия (на СПАВ)	Требуют узкоспециализированных датчиков, часто — проточной химической подготовки пробы

Практическая значимость исследования определяется созданием инструментально-методической базы для внедрения ИИС контроля полей загрязнения водных объектов на промышленно развитых территориях, что обеспечивает:

- возможность непрерывного автоматизированного контроля качества воды в ключевых створах и зонах потенциального риска с дискретностью до 1 минуты, что ранее было недостижимо при традиционном лабораторном анализе;
- оперативное обнаружение аварийных и залповых сбросов за счёт интеллектуального анализа данных реального времени и автоматической активации пробоотборников, что сокращает время реагирования с суток до минут;
- построение актуальных карт полей загрязнения (распределения концентраций зв по акватории) с использованием современных методов интерполяции и учёта гидродинамических факторов, что позволяет выявлять зоны устойчивого превышения ПДК и локализовать источники загрязнения.

Предложенные в работе решения не только соответствуют современным мировым тенденциям развития экологического мониторинга (IoT, большие данные, искусственный интеллект), но и адаптированы к конкретным климатическим условиям, качеству поверхностных водных объектов и требованиям к эксплуатации данных систем. Это обеспечивает возможность их практического внедрения на промышленно развитых территориях Российской Федерации с получением значительного экологического и экономического эффекта.

Выводы. Построение информационно-измерительной системы контроля полей загрязнения водных объектов на промышленно развитых территориях представляет собой сложную, но необходимую задачу, направленную на обеспечение экологической безопасности и устойчивого развития регионов. В ходе выполненного исследования были систематизированы и обоснованы ключевые принципы построения таких систем, включая репрезентативность и достаточность сети наблюдений, приоритетность контролируемых параметров, адекватность технологий измерения, автономность и надёжность оборудования, а также интеллектуальную обработку данных. Реализация этих принципов позволила создать не просто совокупность измерительных устройств, а целостный технологический комплекс, способный функционировать в сложных условиях промышленных зон и обеспечивать лиц, принимающих решения, достоверной и своевременной информацией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Розенталь, О. М. Хемометрический подход к оценке состава вод Исаковского водохранилища / О. М. Розенталь, Г. Б. Крохин // Химия в интересах устойчивого развития. – 2025. – № 3. – С. 373-382. – DOI 10.15372/KhUR2025662. – EDN HTFDIY.
2. Оценка качества поверхностных вод по интегральным показателям (на примере Верхневолжского водохранилища) [Электронный ресурс]. – URL: <https://science-education.ru/article/view?id=23406> (дата обращения 10.03.2026).
3. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. – Введ. 2003-01-01. – М.: Росгидромет. – 2002. – 21 с.
4. Статистические аспекты внутрисуточных колебаний показателей качества воды (на примере Камского водохранилища) / Т. Н. Синцова, А. П. Лепихин, Л. Ю. Левин [и др.] // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 17-35. – EDN KAEXPS.
5. Емельянова, В. П. К вопросу развития технологий оценки степени загрязненности водных объектов на основе показателей комплексности загрязнения / В. П. Емельянова, Н. Н. Оленникова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2023. – № 6. – С. 6-20. – EDN QROKXO.
6. Обзор методов контроля и оценки сточных вод при условии многоточечного сброса загрязняющих веществ / В. М. Панарин, А. А. Маслова, Е. М. Рылеева, В. А. Браун // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 11-19. – DOI 10.5281/zenodo.15056656. – EDN KSKWWO.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684157 Российская Федерация. Программа расчета величины допустимого сброса загрязняющего вещества для отдельного выпуска сточных вод в водоемы на территориях промышленно развитых регионов: заявл. 19.08.2025; опубл. 11.09.2025 / В. М. Панарин, Е. М. Рылеева, А. А. Маслова [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – EDN ZBIOSK.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684155 Российская Федерация. Программа расчета величины допустимого сброса загрязняющего вещества для отдельного выпуска сточных вод в водотоки на территориях промышленно развитых регионов: заявл. 19.08.2025; опубл. 11.09.2025 / В. М. Панарин, Е. М. Рылеева, К. С. Соловьева, Е. А. Савина; заявитель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – EDN URBAMK.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025696075 Российская Федерация. Программное обеспечение для моделирования изменения концентрации загрязняющих веществ на произвольно заданном расстоянии от точечного источника выбросов: заявл. 08.12.2025; опубл. 16.12.2025 / В. М. Панарин, С. П. Туляков, Е. М. Рылеева; заявитель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – EDN TXFLAR.

REFERENCES LIST

1. Rozental, O. M. Khemometricheskii podkhod k otsenke sostava vod Isakovskogo vodokhranilishcha / O. M. Rozental, G. B. Krokhin // Khimiia v interesakh ustoichivogo razvitiia. – 2025. – № 3. – S. 373-382. – DOI 10.15372/KhUR2025662. – EDN HTFDIY.
2. Otsenka kachestva poverkhnostnykh vod po integralnym pokazateliam (na primere Verkhnevolzhskogo vodokhranilishcha) [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://science-education.ru/article/view?id=23406> (data obrashcheniia 10.03.2026).
3. RD 52.24.643-2002. Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagriaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazateliam. – Vved. 2003-01-01. – M.: Rosgidromet. – 2002. – 21 s.
4. Statisticheskie aspekty vnutrisutochnykh kolebanii pokazatelei kachestva vody (na primere Kamskogo vodokhranilishcha) / T. N. Sintsova, A. P. Lepikhin, L. Iu. Levin [i dr.] // Vestnik Permskogo federalnogo issledovatel'skogo tsentra. – 2025. – № 4. – S. 17-35. – EDN KAEXPS.
5. Emelianova, V. P. K voprosu razvitiia tekhnologii otsenki stepeni zagriaznennosti vodnykh obiektov na osnove pokazatelei kompleksnosti zagriazneniia / V. P. Emelianova, N. N. Olennikova // Vodnoe khoziaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. – 2023. – № 6. – S. 6-20. – EDN QROKXO.
6. Obzor metodov kontroliia i otsenki stochnykh vod pri uslovii mnogotochechnogo sbrosa zagriazniaiushchikh veshchestv / V. M. Panarin, A. A. Maslova, E. M. Ryleeva, V. A. Braun // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 1. – S. 11-19. – DOI 10.5281/zenodo.15056656. – EDN KSKWWO.

7. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2025684157 Rossiiskaia Federatsiia. Programma rascheta velichiny dopustimogo sbrosa zagriazniaiushchego veshchestva dlia otdelnogo vypuska stochnykh vod v vodoemy na territoriiakh promyshlenno razvitykh regionov: zaiavl. 19.08.2025: opubl. 11.09.2025 / V. M. Panarin, E. M. Ryleeva, A. A. Maslova [i dr.]; zaiavitel FGBOU VO «Tulskii gosudarstvennyi universitet». – EDN ZBIOSK.
8. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2025684155 Rossiiskaia Federatsiia. Programma rascheta velichiny dopustimogo sbrosa zagriazniaiushchego veshchestva dlia otdelnogo vypuska stochnykh vod v vodotoki na territoriiakh promyshlenno razvitykh regionov: zaiavl. 19.08.2025: opubl. 11.09.2025 / V. M. Panarin, E. M. Ryleeva, K. S. Soloveva, E. A. Savina; zaiavitel FGBOU VO «Tulskii gosudarstvennyi universitet». – EDN URBAMK.
9. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2025696075 Rossiiskaia Federatsiia. Programmnoe obespechenie dlia modelirovaniia izmeneniia kontsentratsii zagriazniaiushchikh veshchestv na proizvolno zadannom rasstoianii ot tochechnogo istochnika vybrosov: zaiavl. 08.12.2025: opubl. 16.12.2025 / V. M. Panarin, S. P. Tuliakov, E. M. Ryleeva; zaiavitel FGBOU VO «Tulskii gosudarstvennyi universitet». – EDN TXFLAR.

Поступила в редакцию 13.03.2026 г., рекомендована к изданию 30.03.2026 г.

CONSTRUCTING AN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR MONITORING WATER POLLUTION FIELDS IN INDUSTRIALLY DEVELOPED AREAS

Panarin V.M., Ryleeva E.M., Maslova A.A.

This article examines an integrated methodological approach to developing an information and measurement system (IMS) for monitoring the condition of surface water bodies under high anthropogenic loads. The paper systematizes and details the key principles for constructing such systems: consistency and complexity, hierarchy, target orientation, integration of heterogeneous data, adaptability, and intelligent analysis. Particular attention is paid to the specifics of monitoring priority industrial pollutants, methods of spatiotemporal data analysis, and integration with decision support systems.

Keywords: information and measuring system, water body monitoring, pollution field, water quality, industrial area, sensors, wireless sensor networks, geographic information systems.

Панарин Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Российская Федерация, г. Тула.
E-mail: panarin_tsu@yandex.ru

Panarin Vladimir Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Labor and Environmental Protection of Tula State University, Russian Federation, Tula.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0431-3640>

Рылеева Евгения Михайловна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Российская Федерация, г. Тула.
E-mail: ryleevaem_tsu@mail.ru

Ryleeva Evgeniya Mikhailovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Labor and the Environmental Protection of Tula State University, Russian Federation, Tula.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6442-6970>

Маслова Анна Александровна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Российская Федерация, г. Тула.
E-mail: anna_zuykova@rambler.ru

Maslova Anna Aleksandrovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Labor and Environmental Protection of Tula State University, Russian Federation, Tula.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5974-3800>

**ЕСТЕСТВЕННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ НЕИДЕАЛЬНЫХ
СВЕРХРЕШЕТОК СО СТЕРЕОИЗОМЕРНЫМИ ПРИМЕСНЫМИ СЛОЯМИ**

© 2026 Федоров С.А., Безус Ю.А., Безус А.В.

В работе проведено феноменологическое рассмотрение и численное моделирование гиротропии неидеальных двухподрешеточных многослойников со стереоизомерными инородными структурными элементами. Исследована концентрационная зависимость угла вращения плоскости поляризации электромагнитной волны для двух типов разупорядочения рассматриваемых систем.

Ключевые слова: неидеальная сверхрешетка, гиротропия, энантиоморфная форма, жидкий кристалл, кристаллический α -кварц SiO_2 .

Введение. В настоящее время имеется значительное число работ посвященных исследованиям оптических свойств идеальных и неидеальных диэлектрических сред [1-14]. Актуальность таких исследований обусловлена как логикой развития науки [1-3], так и потребностями электротехники и электроники слоистых структур [4-5], современным уровнем развития нанотехнологий [6-7], а также необходимостью моделирования многофункциональных композитных материалов с заданными свойствами [6-10]. Особый интерес при этом представляют пространственно-диспергирующие сверхрешетки [9-12], гиротропные свойства которых являются основой для создания эффективных экспериментальных методик идентификации различных механизмов гиротропии и выявления тонких структурных особенностей рассматриваемых сред [13]. Ценность таких исследований очевидна, поскольку в настоящее время имеется большое количество сложных органических комплексов и полимеров [14], которые являются оптически активными вследствие особенностей структуры или оптической активности входящих в их состав молекул. Причем гиротропия часто является единственно возможным способом [13] определения стерео- и кристаллохимических характеристик, а также важных деталей строения соответствующих пространственно-диспергирующих структур.

Полученные в [9-12] аналитические выражения для угла вращения плоскости поляризации электромагнитной волны, распространяющейся вдоль оптической оси (параллельной слоевым оптическим осям) сверхрешетки позволяют выполнять численное моделирование зависимости оптической активности от частоты света и концентрации инородных (примесных) слоев. Выполненные в [9-12] конкретные расчеты параметров гиротропии соответствующих сред позволяют выявлять ее особенности для систем с инородными слоями, отличающимися друг от друга по химическому составу.

В этой связи актуальным является изучение оптической активности таких неидеальных сверхрешеток, в которых примесные слои разных сортов имеют одинаковый химический состав, однако отличаются своими стереоизомерными (энантиоморфными) формами. Таким структурам соответствуют право- и левовращающие пространственно-диспергирующие среды.

В настоящей работе изучается естественная оптическая активность двухподрешеточных многослойников (разупорядоченных как по составу, так и по толщине) со стереоизомерными инородными структурными элементами. Ниже в

качестве слоев основного вещества выбраны модельный жидкий кристалл (первая подрешетка с удельным углом вращения $\rho_1^{(1)} = 2000$ град/мм) и кристаллический α -кварц SiO_2 (вторая подрешетка с удельным углом вращения $\rho_2^{(1)} = 780$ град/мм); дефектными структурными элементами являются левовращающие (с удельным углом вращения $\rho_{1,2}^{(2)-} = -1053$ град/мм) и правовращающие (с удельным углом вращения $\rho_{1,2}^{(2)+} = +1053$ град/мм) модельные слои кристалла.

В дальнейшем рассматривается два случая.

Разупорядочение только по составу. В этом случае имеется 4 типа оптически активных сверхрешеток. Концентрационная зависимость приведенных углов вращения

$\rho(C_{1C}^{(2)}, C_{2C}^{(2)})$ для них описываются, как следует из [11], следующими формулами (1-4):

$$\frac{\rho(C_{1C}^{(2)}, C_{2C}^{(2)})}{N(a_1 + a_2)} = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \left[\rho_1^{(1)} + (\rho_1^{(2)+} - \rho_1^{(1)}) C_{1C}^{(2)} \right] + \frac{a_2}{a_1 + a_2} \left[\rho_2^{(1)} + (\rho_2^{(2)+} - \rho_2^{(1)}) C_{2C}^{(2)} \right], \quad (1)$$

здесь в примесной подсистеме содержатся лишь правовращающие структурные элементы:

$$\frac{\rho(C_{1C}^{(2)}, C_{2C}^{(2)})}{N(a_1 + a_2)} = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \left[\rho_1^{(1)} + (\rho_1^{(2)-} - \rho_1^{(1)}) C_{1C}^{(2)} \right] + \frac{a_2}{a_1 + a_2} \left[\rho_2^{(1)} + (\rho_2^{(2)-} - \rho_2^{(1)}) C_{2C}^{(2)} \right], \quad (2)$$

формула (2) соответствует сверхрешетке в которой имеются только левовращающие инородные слои.

$$\frac{\rho(C_{1C}^{(2)}, C_{2C}^{(2)})}{N(a_1 + a_2)} = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \left[\rho_1^{(1)} + (\rho_1^{(2)-} - \rho_1^{(1)}) C_{1C}^{(2)} \right] + \frac{a_2}{a_1 + a_2} \left[\rho_2^{(1)} + (\rho_2^{(2)+} - \rho_2^{(1)}) C_{2C}^{(2)} \right], \quad (3)$$

здесь первая подрешетка содержит левовращающие инородные слои, а вторая подрешетка – правовращающие:

$$\frac{\rho(C_{1C}^{(2)}, C_{2C}^{(2)})}{N(a_1 + a_2)} = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \left[\rho_1^{(1)} + (\rho_1^{(2)+} - \rho_1^{(1)}) C_{1C}^{(2)} \right] + \frac{a_2}{a_1 + a_2} \left[\rho_2^{(1)} + (\rho_2^{(2)-} - \rho_2^{(1)}) C_{2C}^{(2)} \right], \quad (4)$$

в этом случае первая подрешетка содержит правовращающие структурные элементы, а вторая подрешетка – левовращающие.

В формулах (1-4) N – число элементарных ячеек рассматриваемой системы; a_1, a_2 – толщины слоев в первой и второй подрешетках соответственно.

На рис. 1 представлены графические изображения концентрационной зависимости приведенных углов вращения, соответствующих формулам (1-4). Из приведенных графиков видно, что при определенных концентрациях все три типа кристаллов (кроме случая (3)) меняют знак и, следовательно, из левовращающих превращаются в правовращающиеся. Для случая (3) приведенный угол вращения является отрицательным во всей концентрационной области. Кроме того, при различных стереоизомерных формах инородных слоев разных подрешеток, приведенные углы вращения при определенных концентрациях совпадают.

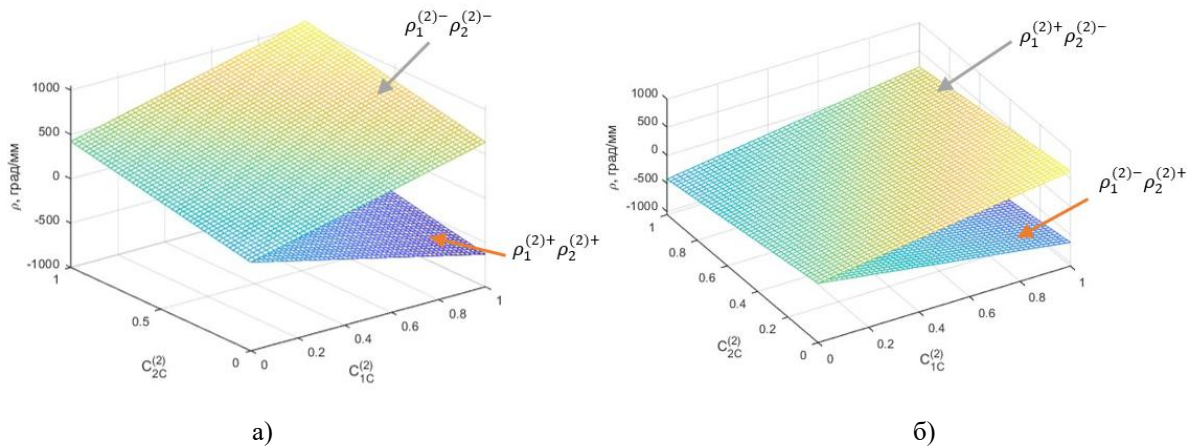


Рис. 1. Концентрационная зависимость приведенного угла вращения, соответствующего формулам:
а) (1, 2); б) (3, 4)

Разупорядочение и по составу, и по толщине. Ниже рассматривается сверхрешетка в которой первая подрешетка разупорядочена и по составу, и по толщине, а всякое разупорядочение во второй подрешетке отсутствует. В этом случае аналитическое выражение для приведенного угла вращения как следует из работы [11] может быть записана следующим образом:

$$\frac{\rho(C_{1C}^{(2)}, C_{1T}^{(2)})}{N(a_1^{(1)} + a_2^{(1)})} = \rho_1^{(1)} \frac{a_1^{(1)}}{a_1^{(1)} + a_2^{(1)}} + \rho_2^{(1)} \frac{a_2^{(1)}}{a_1^{(1)} + a_2^{(1)}} +$$

$$+ C_{1C}^{(2)\pm} (\rho_1^{(2)\pm} - \rho_1^{(1)}) \left[a_1^{(1)} + \frac{a_1^{(2)} - a_1^{(1)}}{a_1^{(1)} + a_2^{(1)}} C_{1T}^{(2)} \right] + \rho_1^{(1)} \frac{a_1^{(2)} - a_1^{(1)}}{a_1^{(1)} + a_2^{(1)}} C_{1T}^{(2)} \quad (5)$$

В формуле (5) $a_1^{(2)}$ – толщина инородных слоев в первой подрешетке; $C_{1T}^{(2)}$ – концентрация этих слоев.

Численное моделирование естественной оптической активности сверхрешеток предполагает детальный анализ концентрационной зависимости приведенного угла вращения в области $0 \leq C_{1C}^{(2)} \leq 1, 0 \leq C_{1T}^{(2)} \leq 1$. Из формулы (5) следует, что внедрение инородных слоев в первую подрешетку может привести (при определенных наборах параметров и концентраций входящих в (5)) не только к изменению знака ее удельного

угла вращения, но и к обращению в ноль функции $\frac{\rho(C_{1C}^{(2)}, C_{1T}^{(2)})}{N(a_1^{(1)} + a_2^{(1)})}$. При этом

концентрации $C_{01C}^{(2)}, C_{01T}^{(2)}$ (называемые нулями оптической активности [11]) для которых $\rho(C_{01C}^{(2)\pm}, C_{01T}^{(2)}) = 0$ связаны между собой соотношением:

$$C_{01C}^{(2)\pm} (C_{01T}^{(2)}) = - \frac{\rho_1^{(1)} a_1^{(1)} + \rho_2^{(1)} a_2^{(1)} + \rho_1^{(1)} \Delta a_1^{(2)} C_{1T}^{(2)}}{\Delta \rho_1^{(2)\pm} (a_1^{(1)} + \Delta a_1^{(2)} C_{1T}^{(2)})}, \quad (6)$$

где $\Delta\rho_1^{(2)\pm} = \rho_1^{(2)\pm} - \rho_1^{(1)}$, $\Delta a_1^{(2)} = a_1^{(2)} - a_1^{(1)}$. Графическое изображение функции (6) представляет определенную кривую, расположенную в концентрационной области $(C_{01C}^{(2)\pm}, C_{01T}^{(2)})$. Очевидно, что физический смысл указанной кривой имеют лишь те ее участки, которые расположены в области квадрата $0 \leq C_{1C}^{(2)} \leq 1$, $0 \leq C_{1T}^{(2)} \leq 1$. Условия существования нулей оптической активности требует анализа значений функции $(C_{01C}^{(2)\pm}, C_{01T}^{(2)})$, результаты которого приведены ниже.

I. $\Delta\rho_1^{(2)\pm} < 0, \Delta a_1^{(2)} > 0$. В этом случае возможна лишь одна линия нулей, которая реализуется при $C_{01C}^{(2)\pm}(0) < 1$ (соответствующая линия нулей изображена на рис.2), либо при $\frac{\rho_1^{(1)}}{\Delta\rho_1^{(2)\pm}} < 1$, $C_{01C}^{(2)\pm}(0) > 1$ и $C_{01C}^{(2)\pm}(1) < 1$.

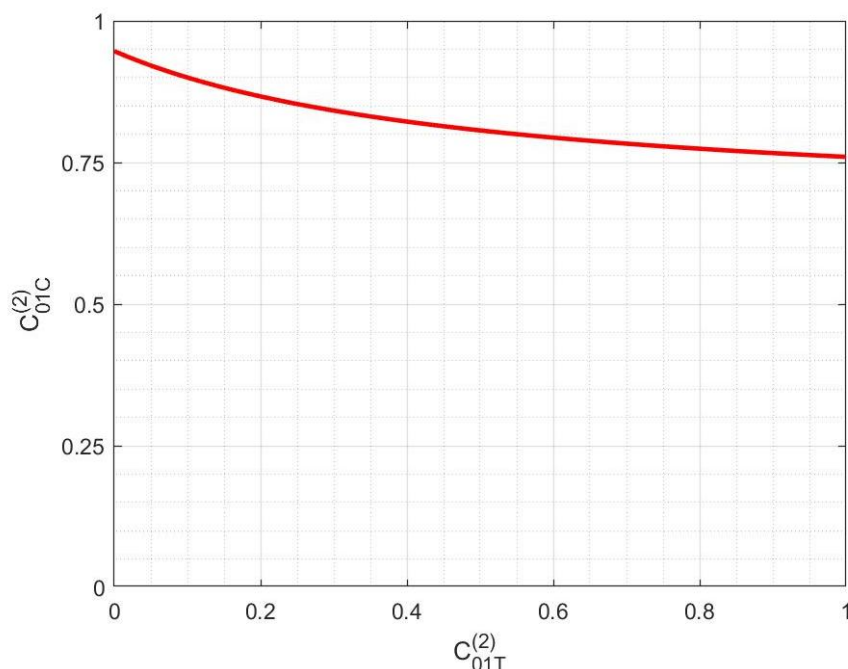


Рис. 2. Линия нулей оптической активности для случая $\Delta\rho_1^{(2)\pm} < 0, \Delta a_1^{(2)} > 0$ и $C_{01C}^{(2)\pm} < 1$

II. $\Delta\rho_1^{(2)\pm} > 0, \Delta a_1^{(2)} > 0$. При выполнении указанных неравенств нули оптической активности отсутствуют.

III. $\Delta\rho_1^{(2)\pm} < 0, \Delta a_1^{(2)} < 0$. Указанные неравенства допускают наличие как одной, так и двух линий нулей. Одна линия нулей реализуется при $C_{01C}^{(2)\pm}(0) < 1$ и

$$\tilde{C}_{01T}^{(2)} \equiv \frac{\rho_1^{(1)} a_1^{(1)} + \rho_2^{(1)} a_2^{(1)}}{\rho_1^{(1)} |\Delta a_1^{(2)}|} > 1. \text{ Либо } C_{01C}^{(2)\pm}(0) > 1 \text{ и } \tilde{C}_{01T}^{(2)} \equiv \frac{\rho_1^{(1)} a_1^{(1)} + \rho_2^{(1)} a_2^{(1)}}{\rho_1^{(1)} |\Delta a_1^{(2)}|} < 1. \text{ Две линии}$$

нулей существуют при $C_{01C}^{(2)\pm}(0) < 1$ и $\tilde{C}_{01T}^{(2)} \equiv \frac{\rho_1^{(1)} a_1^{(1)} + \rho_2^{(1)} a_2^{(1)}}{\rho_1^{(1)} |\Delta a_1^{(2)}|} < 1$.

IV. $\Delta\rho_1^{(2)\pm} > 0, \Delta a_1^{(2)} < 0$. В этом случае нули оптической активности возможны и располагаются лишь на одной линии при $\tilde{C}_{01T}^{(2)} \equiv \frac{\rho_1^{(1)} a_1^{(1)} + \rho_2^{(1)} a_2^{(1)}}{\rho_1^{(1)} |\Delta a_1^{(2)}|} < 1$. При невыполнении указанных численных критериев нули оптической активности отсутствуют, что графически проиллюстрировано на рис. 3-4.

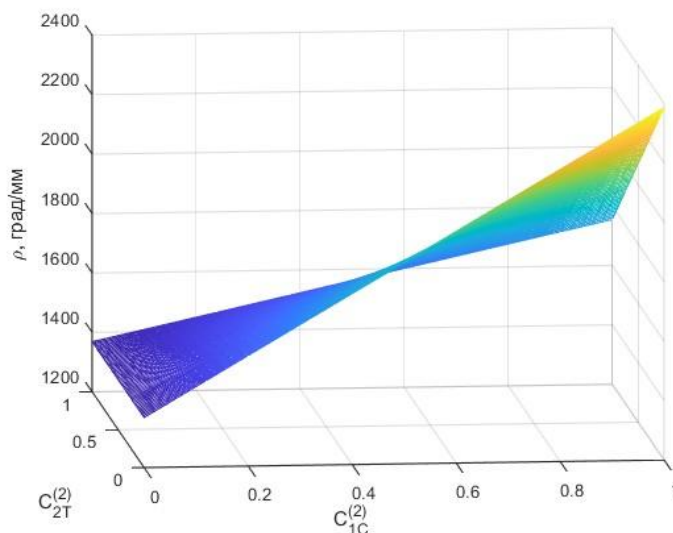


Рис. 3. Концентрационные зависимости оптической активности при $a_1^{(1)} = 1, a_1^{(2)} = 3, a_2^{(1)} = 2$

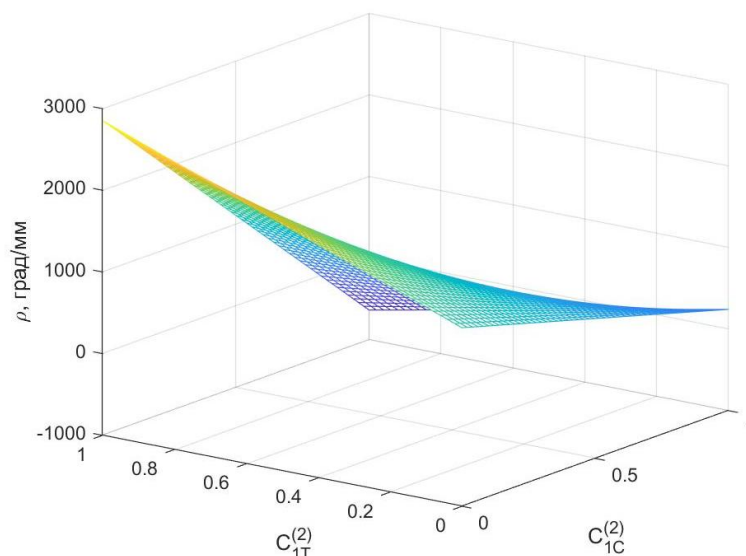


Рис. 4. Концентрационные зависимости угла вращения при $a_1^{(1)} = 1, a_1^{(2)} = 3.5, a_2^{(1)} = 2$

Заключение. В работе с помощью численного моделирования изучены особенности естественной оптической активности неидеальных двухподрешеточных сверхрешеток с энантиоморфными примесными слоями. Для различных параметров системы выявлены концентрационные области, которым соответствуют определенные знаки угла вращения света и его нули. Проведенные в работе исследования значительно расширяют возможности создания гиротропных многослойных композитных материалов с нужными свойствами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Photonic Crystals. Molding the Flow of Light / J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade. – Second Edition. Princeton: Princeton University Press, 2008. – 317 p.
2. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх; перевод с англ. С. Г. Кривошлыкова, Н. И. Петрова; под ред. И. Н. Сисакяна. – Москва: Мир, 1987. – 616 с.
3. Шабанов, В. Ф. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности // В. Ф. Шабанов, С. Я. Ветров, А. В. Шабанов. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2005. – 239 с.
4. Басс, Ф. Г. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешеткам / Ф. Г. Басс, А. А. Булгаков, А. П. Тетервов. – Москва: Наука, 1989. – 286 с.
5. Zhang, C. Layer-by-layer self-assembly of ... patterning flexible substrates / C. Zhang, D.E. Hirt // Polymer. – 2007. – V. 48. – 23. – P. 6748-6754.
6. Экситоноподобные возбуждения в неидеальных гексагональных нанорешетках микропор / Ю. А. Безус, А. Е. Рыбалка, В. В. Румянцев [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 5-10. – DOI 10.5281/zenodo.15056632. – EDN HLMCFF.
7. Безус, Ю. А. Естественная оптическая активность неидеальной двухподрешеточной сверхрешетки с энантиоморфными слоями / Ю. А. Безус, С. А. Федоров // Донецкие чтения - 2025: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : Материалы X Международной научной конференции, Донецк, 05–07 ноября 2025 года. Том 2. Физические, технические и компьютерные науки. – Донецк: ДонГУ, 2025. – С. 82-84. – EDN JVJINL.
8. Румянцев, В. В. Трансформация поляритонного спектра неидеальных топологически упорядоченных сверхрешеток / В.В. Румянцев, С.А. Федоров // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 102. – №1. – С. 75-79.
9. Румянцев, В. В. Численное моделирование частотно-концентрационной зависимости оптической активности неидеальных сверхрешеток / В.В. Румянцев, С.А. Федоров, М.В. Проскуренок // Математическое моделирование. – 2010. – 2(23). – С. 37-42.
10. Romyantsev, V. V. Frequency-Concentration Dependence of Optical Activity of a Non-Ideal 1D-Superlattice / V. V. Romyantsev, S. A. Fedorov / Journal of Modern Physics. – 2011. – V. 2. – P. 1574-1578.
11. Особенности гиротропии неидеальной однородной ЖК/SiO₂ сверхрешетки с примесями LiO₃ / В. В. Румянцев, С. А. Федоров, М. В. Проскуренок, М. И. Мохненко // Сложные системы и процессы. – 2012. – №1(21). – С. 57-62.
12. Особенности гиротропии неидеального оптически активного одномерного фотонного ориентационно-разупорядоченного кристалла / В. В. Румянцев, С. А. Федоров, К. В. Гуменник, А. Е. Рыбалка // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. – 89 (3). – С. 354-359.
13. Кизель, В. А. Гиротропия кристаллов / В.А. Кизель, В. И. Бурков. – М.: Наука, 1980. – 304 с.
14. Матвеев, Ю. С. Хиральные терпеновые алкоголяты алюминия (ментилат и борнилалаты) / Ю. С. Матвеев, Н. А. Катаева, А. В. Кучин // Химия растительного сырья. – 1999. – №1. – С.13-26.

REFERENCES LIST

1. Photonic Crystals. Molding the Flow of Light / J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade. – Second Edition. Princeton: Princeton University Press, 2008. – 317 p.
2. Yariv, A. Opticheskie volny v kristallakh / A. Yariv, P. Iukh; perevod s angl. S. G. Krivoshlykova, N. I. Petrova; pod red. I. N. Sisakiana. – Moskva: Mir, 1987. – 616 s.
3. Shabanov, V. F. Optika realnykh fotonnykh kristallov. Zhidkokristallicheskie defekty, neodnorodnosti // V. F. Shabanov, S. Ia. Vetrov, A. V. Shabanov. – Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2005. – 239 s.
4. Bass, F. G. Vysokochastotnye svoistva poluprovodnikov so sverkhreshetkam / F. G. Bass, A. A. Bulgakov, A. P. Tetervov. – Moskva: Nauka, 1989. – 286 s.
5. Zhang, C. Layer-by-layer self-assembly of ... patterning flexible substrates / C. Zhang, D.E. Hirt // Polymer. – 2007. – V. 48. – 23. – P. 6748-6754.
6. Eksitonopodobnye возбуждения в неидеальных гексагональных nanoreshetkakh mikropor / Iu. A. Bezus, A. E. Rybalka, V. V. Rumiantsev [i dr.] // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 1. – S. 5-10. – DOI 10.5281/zenodo.15056632. – EDN HLMCFF.
7. Bezus, Iu. A. Estestvennaia opticheskaiia aktivnost neidealnoi dvukhpodreshetochnoi sverkhreshetki s enantiomorfnyimi sloiami / Iu. A. Bezus, S. A. Fedorov // Donetskies chteniia - 2025: obrazovanie, nauka, innovatsii, kultura i vyzovy sovremennosti : Materialy X Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Donetsk, 05–07 noiabria 2025 goda. Tom 2. Fizicheskie, tekhnicheskie i kompiuternye nauki. – Donetsk: DonGU, 2025. – S. 82-84. – EDN JVJINL.

8. Rumiantsev, V. V. Transformatsiia poliaritonnoogo spektra neidealnykh topologicheskikh uporiadochennykh sverkhreshetok / V.V. Rumiantsev, S.A. Fedorov // Optika i spektroskopiia. – 2007. – Т. 102. – №1. – С. 75-79.
9. Rumiantsev, V. V. Chislennoe modelirovanie chastotno-kontsentratsionnoi zavisimosti opticheskoi aktivnosti neidealnykh sverkhreshetok / V.V. Rumiantsev, S.A. Fedorov, M.V. Proskurenko // Matematicheskoe modelirovanie. – 2010. – 2(23). – С. 37-42.
10. Romyantsev, V. V. Frequency-Concentration Dependence of Optical Activity of a Non-Ideal 1D-Superlattice / V. V. Romyantsev, S. A. Fedorov / Journal of Modern Physics. – 2011. – V. 2. – P. 1574-1578.
11. Osobennosti girotropii neidealnoi odnorodnoi ZhK/SiO₂ sverkhreshetki s primesiami LiO₃ / V. V. Rumiantsev, S. A. Fedorov, M. V. Proskurenko, M. I. Mokhnenko // Slozhnye sistemy i protsessy. – 2012. – №1(21). – С. 57-62.
12. Osobennosti girotropii neidealnogo opticheskikh aktivnogo odnomernogo fotonnogo orientatsionno-razuporiadochennogo kristalla / V. V. Rumiantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennik, A. E. Rybalka // Zhurnal prikladnoi spektroskopii. – 2022. – 89 (3). – С. 354-359.
13. Kizel, V. A. Girotropiia kristallov / V.A. Kizel, V. I. Burkov. – М.: Nauka, 1980. – 304 s.
14. Matveev, Iu. S. Khiralnye terpenovye alkogoliaty aliuminiia (mentilat i bornilaty) / Iu. S. Matveev, N. A. Kataeva, A. V. Kuchin // Khimiia rastitelnogo syria. – 1999. – №1. – С.13-26.

Поступила в редакцию 20.03.2026 г., рекомендована к изданию 03.04.2026 г.

NATURAL OPTICAL ACTIVITY OF NON-IDEAL SUPERLATTICES WITH STEREOISOMERIC IMPURITY LAYERS

Fedorov S.A., Bezus I.U.A., Bezus A.V.

A phenomenological analysis and numerical modeling of the gyrotropy of imperfect two-sublattice multilayer structures containing stereoisomeric foreign structural elements have been carried out. The concentration dependence of the rotation angle of the electromagnetic-wave polarization plane has been investigated for two types of disorder in the considered systems.

Keywords: imperfect superlattice, gyrotropy, enantiomorphic form, liquid crystal, crystalline α -quartz SiO₂.

Федоров Станислав Афанасьевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: s.fedorov2023@yandex.ru

Fedorov Stanislav Afanasevich

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Researcher of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5587-425X>

Безус Юлия Александровна

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: paladyan0108@yandex.ru

Bezus Iuliia Aleksandrovna

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Research Assistant of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2385-0441>

Безус Алексей Викторович

кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики и дидактики физики ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: a.bezus@mail.ru

Bezus Aleksei Viktorovich

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Head of the Department of General Physics and Didactics of Physics of Donetsk State University
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0865-6194>

МЕТОД РАСЧЕТА РАССТОЯНИЯ ОТ ПОВЕРНУТОГО ОБЪЕКТА ДО ГРАНИЦ ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2026 Казаков В.В., Карповский А.Ю., Довгань А.Ю.

В статье предлагаются математические методы расчета расстояния от начала координат системы объекта до границы пространства при повернутом объекте и устройстве измерения, находящемся в любой точке объекта и неподвижным относительно объекта. По вычисленным расстояниям вычисляется угол курса, смещение объекта по трем осям при заданной траектории.

Ключевые слова: математические методы, позиционирование, ограниченное пространство, объект, расстояние, угол, проходческий комбайн.

Введение. В соответствии со стратегией научно-технологического развития РФ [1] актуальной задачей является повышение роботизации в разных областях. В настоящее время применительно к добыче угля требуется значительное увеличение темпов проведения подготовительных горных выработок.

При ручном управлении проходческим комбайном со стреловидным исполнительным органом машинист выполняет ряд функций, в том числе:

- выбирает схему обработки забоя в зависимости от состояния породного массива, принятой технологии, своих навыков и опыта,
- следит за состоянием породного массива, процессом его разрушения, размещением комбайна в выработке, пылегазовым режимом, состоянием отдельных узлов и механизмов.

При влиянии человеческого фактора на процесс разрушения горной массы возможны ситуации:

- недостаточно точная обработка контура выработки, приводящая к переборам по сечению и к значительному объему забутовки пустот, к снижению устойчивости горной выработки;
- значительное время отработки цикла по разрушению забоя из-за затрат времени на принятие решения по выбору схемы обработки забоя, изменению положения исполнительного органа и дополнительных перемещениях комбайна;
- высокая трудоемкость управления, приводящая к высокой напряженности работы машиниста и его ошибкам.

Так как одной из проблем стреловидного проходческого комбайна является его смещение в процессе обработки забоя, несмотря на применяемые средства стабилизации, необходимо разрабатывать и применять аппаратно-программные комплексы, которые обеспечат обработку забоя по заданной программе с автоматическим более точным выдерживанием заданного профиля забоя [2] путем его более точного позиционирования.

Применительно к проходческому комбайну система позиционирования означает определение его положения и позиционирование корпуса комбайна относительно пространства забоя, позиционирование исполнительного органа и подъёмно-поворотной секции конвейера [3] сначала относительно корпуса комбайна, затем относительно пространства забоя.

Цель исследований - сформировать методические основы для позиционирования объекта управления (проходческого комбайна), разработать математические методы с применением необходимого математического аппарата.

Эта статья продолжает описание математических методов, приведенных в статье [4]. Так как предлагаемые методы ниже по тексту могут быть применены не только для проходческого комбайна, то далее в статье вместо словосочетания «проходческий комбайн» целесообразно применить слово «объект».

Метод расчета углов поворота объекта путем измерения расстояний до границ пространства. Для описания метода на рисунке 1 показана модель объекта в форме прямоугольного параллелепипеда в начальном положении.



Рис. 1. Модель объекта в форме прямоугольного параллелепипеда в начальном положении

Модель объекта показана в сечении контура ограниченного пространства с разными видами и без прорисовки каких-то опор объекта.

Допустим, что ограниченное пространство также представлено прямоугольным параллелепипедом.

Для ограниченного пространства выбрана система координат $0X_{\text{п}}Y_{\text{п}}Z_{\text{п}}$. Оси $X_{\text{п}}$ и $Y_{\text{п}}$ – горизонтальные, перпендикулярные друг к другу, находятся внизу границы пространства (и точка 0 системы также на нижней границе). Ось $Z_{\text{п}}$ – вертикальная, значение высоты обозначено буквой H . Допустим ось $Y_{\text{п}}$ находится на одинаковом расстоянии от боковых границ, половины (по оси $X_{\text{п}}$) обозначены как $D_{\text{п}}$, $D_{\text{л}}$.

Для объекта выбраны три системы координат $0uvw$, $0x_a y_a z_a$, $0xyz$. Все три системы координат взаимосвязаны так, что перемещаются с перемещением объекта.

О системе координат $0uvw$. Предлагается трёхмерная система координат $0uvw$. Система $0uvw$ выбрана для объекта так, что она неподвижна относительно объекта. При повороте объекта тот же поворот и системы $0uvw$. При движении (или остановке) объекта точка ноль системы координат $0uvw$ в каждый момент времени находится в какой-то точке фактической траектории объекта. В начальном положении оси u и v горизонтальные, а w – вертикальная ось. На рисунке обе оси u , v находятся в плоскости, проходящей через нижнюю часть объекта.

О системе координат $0x_a y_a z_a$. Предлагается трёхмерная система координат $0x_a y_a z_a$. Нулевая точка системы $0x_a y_a z_a$ при поворотах и движении объекта совпадает с нулевой точкой системы $0uvw$. Оси x_a , y_a , z_a соответственно параллельны осям $X_{\text{п}}$, $Y_{\text{п}}$, $Z_{\text{п}}$ системы координат $0X_{\text{п}}Y_{\text{п}}Z_{\text{п}}$ и имеют те же направления. На рисунке обе оси x_a , y_a находятся в плоскости, проходящей через нижнюю часть объекта.

О системе координат $Oxyz$. При любых поворотах и перемещениях объекта плоскость Oxz включает начало координат системы $0uvw$. При движении (или остановке) объекта точка ноль системы координат $Oxyz$ в каждый момент времени находится в какой-то точке заданной траектории объекта. В перемещающейся системе координат $Oxyz$ оси x, y, z соответственно параллельны осям $X_{\Pi}, Y_{\Pi}, Z_{\Pi}$ системы координат $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ и имеют те же направления. На рисунке обе оси x, y находятся в плоскости, проходящей через нижнюю часть объекта.

На рисунке оси x, y, z совпадают (поэтому не показаны) с осями x_a, y_a, z_a системы координат $Ox_a y_a z_a$, так как находятся в начальном положении.

Объект в ограниченном пространстве перемещается, в том числе и поворачивается. Для измерения угла поворота объекта предлагается вариант с использованием двух устройств измерения расстояния. На рисунке 2 показан объект с двумя устройствами измерения в начальном положении.

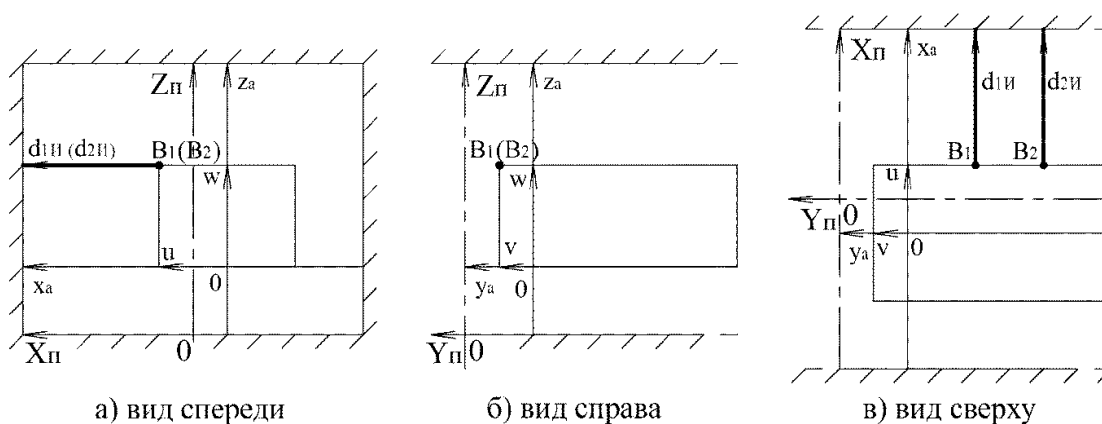


Рис. 2. Объект с двумя устройствами измерения в начальном положении

Устройства измерения B_1, B_2 установлены параллельно друг к другу, перпендикулярно боковой плоскости объекта, с одинаковыми абсциссами и аппликатами в системе $0uvw$, неподвижны относительно объекта и на верхней его поверхности. В системе $0uvw$ координаты установки устройств $B_1(u_{B1}, v_{B1}, w_{B1}), B_2(u_{B2}, v_{B2}, w_{B2})$. Измеряемые устройствами B_1, B_2 расстояния до границы (стенки) пространства соответственно равны $d_{1\Pi}$ и $d_{2\Pi}$.

В предыдущей статье [4] значения углов крена, тангажа, курса обозначены буквами: ω (крена), ψ , (тангажа), θ (курса). Допустим, что объект повернут вокруг оси z_a (ось совпадает с осью w) на угол курса θ и вокруг оси y_a на угол крена ω . На рисунке 3 показан вид двух лучей после обоих поворотов. Повороты объекта показаны в пространстве с разных сторон и только вокруг двух осей. Поворот вокруг третьей оси на угол тангажа не меняет измеряемые расстояния ($d_{1\Pi}$ и $d_{2\Pi}$). С помощью устройств B_1 и B_2 , измеряющих расстояние до границы (стенки), в таком положении можно определить угол курса θ . Угол курса θ это угол отклонения объекта от оси y в плоскости системы Oxy . Для его определения необходимо измерить расстояния $d_{1\Pi}$ и $d_{2\Pi}$ обоих лучей соответственно устройств B_1 и B_2 , проанализировать положение обоих лучей в пространстве $Oxyz$ до и после поворотов. При фиксированном угле θ расстояния $d_{1\Pi}$ и $d_{2\Pi}$ меняются с поворотом вокруг оси y_a на угол ω , но разность между лучами $d_{1\Pi}$ и $d_{2\Pi}$ не меняется. Это видно из рисунка 3.

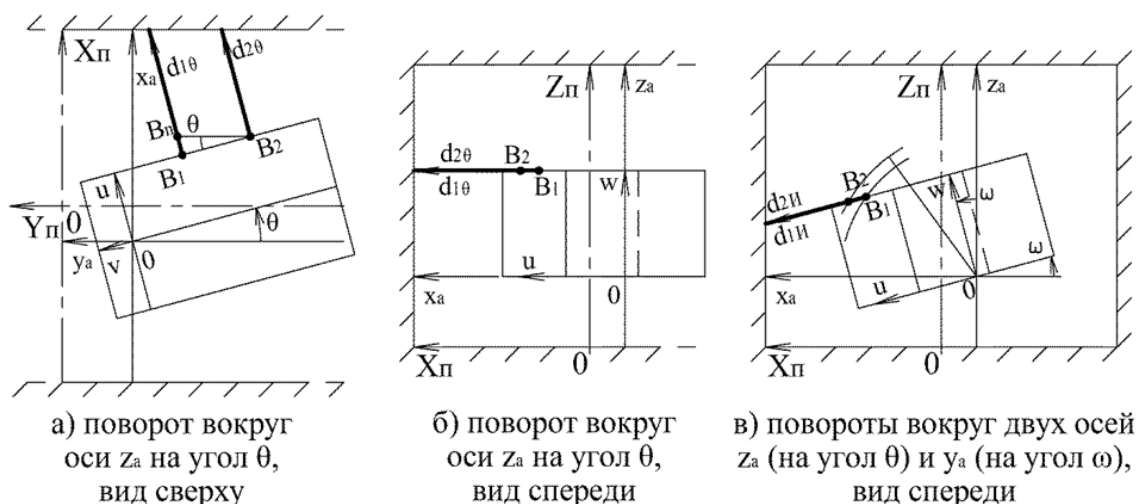


Рис. 3. Вид двух лучей после обоих поворотов

Если через точку B_2 провести плоскость параллельную границе (стенке), плоскости Oyz , то между параллельными плоскостями (стенки и проведенной) расстояния отрезков двух параллельных лучей будут равны, подтверждается это и видом на рисунке 3в тем, что устройства вращаются по окружности вокруг оси y_a по зафиксированным радиусам (так как смонтированы параллельными друг к другу). Из треугольника $B_1B_2B_n$ (рисунок 3а), используя значение разности расстояний ($d_{1H} > d_{2H}$ для этого рисунка) и модуль разности ординат ($v_{B1} < 0, v_{B2} < 0, v_{B1} > v_{B2}$) устройств, можно написать формулы для угла курса θ с учетом знака угла:

$$\operatorname{tg} \theta = (d_{1H} - d_{2H}) / (|v_{B1} - v_{B2}|), \quad (1)$$

$$\theta = \arctg((d_{1H} - d_{2H}) / (|v_{B1} - v_{B2}|)).$$

Если $d_{1H} < d_{2H}$, то угол курса θ из формулы (1) будет отрицательным, что означает поворот по курсу в отрицательную сторону от оси y .

Любой угол поворотов можно определить указанным способом. Есть устройства измерения, которые измеряют одновременно оба взаимно перпендикулярные углы горизонтальности, то углы крена и тангажа рациональнее измерять такими устройствами. Если вибрации объекта в допустимых пределах вибраций устройств измерения, то все три угла можно определить с помощью одного устройства измерения.

Для формул поворота в пространстве необходимо знание не только трех углов поворота (ω, ψ, θ), но и знание трех координат (x_0, y_0, z_0) переноса начала системы.

Метод расчета расстояния от повернутого объекта до границ ограниченного пространства. Для описания метода применим тот же объект, в форме прямоугольного параллелепипеда. Объект показан на рисунке 1 в начальном положении. Для объекта выберем те же системы координат. Допустим, что в начальном положении расстояние d_0 это фактическое расстояние от точки $O(0,0,0)$ в системе $0uvw$ объекта до границы (стенки) и перпендикулярно ей (в системе $0xyz$).

Рассмотрим вариант, в котором устройство измерения расстояния находится в точке O системы $0uvw$ (в модели это возможно). Устройство измерения установлено

перпендикулярно боковой плоскости объекта и неподвижно относительно объекта. В таком варианте расстояние d_0 до стенки можно определить со знанием угла курса θ и угла крена ω объекта, а также измеренного расстояния устройством после обоих поворотов объекта. После каждого поворота объекта измеряемое расстояние будет другим. Измеряемые устройством значения расстояний до границы (стенки) пространства после поворотов объекта только на угол θ , только на угол ω , на оба угла соответственно равны d_θ , d_ω , $d_{\theta\omega}$.

Поворот вокруг третьей оси на угол тангажа не меняет измеряемое расстояние d_0 . Представим повороты объекта, а значит и его точек, как последовательность поворотов вокруг оси w на угол θ и затем вокруг оси y_a на угол ω . На рисунке 4 показаны повороты объекта и измерение расстояния до стенки из точки 0.

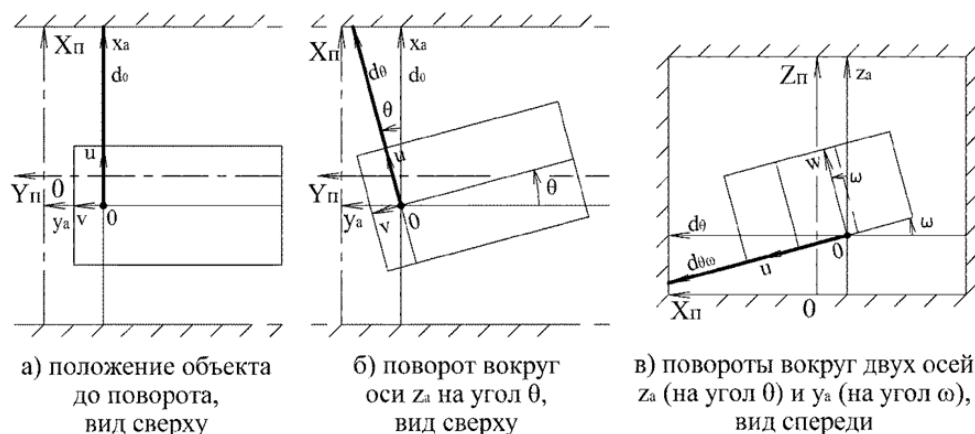


Рис. 4. Повороты объекта и измерение расстояния до стенки из точки 0

Повороты объекта показаны в пространстве с разных сторон и только вокруг двух осей.

Анализируя повороты и обращая внимание на то, что измерение ведется из одной и той же точки 0 до стенки (плоскости) с начальным положением перпендикулярно стенке (d_0), можно отрезки лучей устройства измерения при разных поворотах использовать для построения из точки 0 прямоугольного параллелепипеда. На рисунке 5 показаны расстояния после каждого поворота, формирующие прямоугольный параллелепипед с устройством измерения в точке 0. На рисунке 5 оси x_a , y_a , z_a параллельны соответствующим осям x , y , z , здесь обозначено:

d_0 - значение расстояния (луча) в начальном положении и перпендикулярного плоскости $Oyuz$ и стенке,

d_θ - значение расстояния повернутого на угол θ ,

d_ω - значение расстояния повернутого на угол ω ,

$d_{\theta\omega}$ - значение расстояния повернутого на оба угла.

Слева на рисунке показана стенка, справа точка 0 системы $Ox_a y_a z_a$, стрелкой указано направление измерительного луча, на основе отрезков лучей построен прямоугольный параллелепипед, в нем $S_{2\theta}$, $S_{2\omega}$ – ребра параллелепипеда сформированные в результате поворота соответственно на угол θ и на угол ω (d_0 тоже ребро).

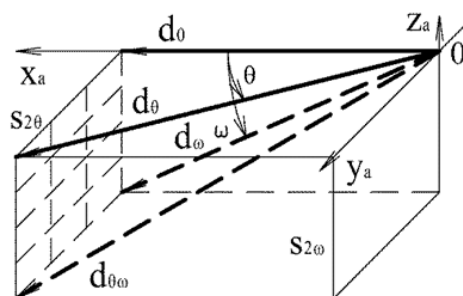


Рис. 5. Расстояния после каждого поворота, формирующие прямоугольный параллелепипед с устройством измерения в точке 0

В сформированном параллелепипеде известны: измеренное расстояние $d_{\theta\omega}$, а также углы θ и ω . Необходимо определить d_0 , d_ω , d_θ . Формулы для разных отрезков в параллелепипеде:

$$d_{\theta\omega}^2 = d_\theta^2 + s_{2\omega}^2, \quad (2)$$

$$d_\theta^2 = d_0^2 + d_{2\theta}^2, \quad (3)$$

$$s_{2\theta} = d_0 \times \operatorname{tg} \theta, \quad (4)$$

$$s_{2\omega} = d_\omega \times \operatorname{tg} \omega. \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (2) уравнения (3), (4), (5), получится:

$$\begin{aligned} d_{\theta\omega}^2 &= d_0^2 + s_{2\theta}^2 + d_\omega^2 \times (\operatorname{tg} \omega)^2 = d_0^2 + (d_0 \times \operatorname{tg} \theta)^2 + d_\omega^2 \times (\operatorname{tg} \omega)^2 = \\ &= d_0^2 \times (1 + (\operatorname{tg} \theta)^2 + (\operatorname{tg} \omega)^2), \\ d_{\theta\omega} &= d_0 \times \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \theta)^2 + (\operatorname{tg} \omega)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

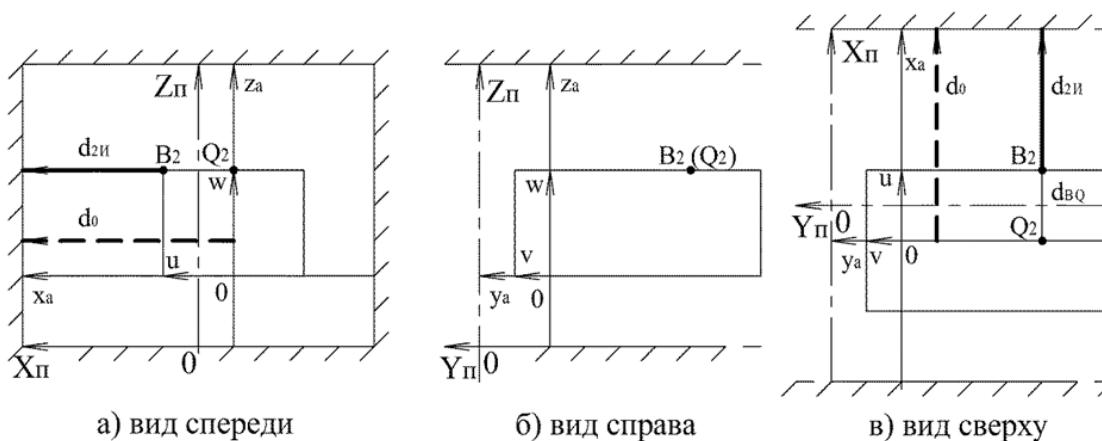
При известном измеренном расстоянии $d_{\theta\omega}$ определяются расстояния d_0 , d_ω , d_θ :

$$d_0 = d_{\theta\omega} / \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \theta)^2 + (\operatorname{tg} \omega)^2}, \quad (7)$$

$$d_\omega = d_0 / \cos \omega, \quad (8)$$

$$d_\theta = d_0 / \cos \theta. \quad (9)$$

Рассмотрен вариант, когда устройство измерения расстояния находится в точке 0. По аналогии с этим вариантом необходимо рассмотреть вариант, в котором устройство измерения может находиться в любой точке объекта, разработать формулы определения расстояния для этого варианта. Для измерения расстояния из любой точки повернутого объекта до границы пространства предлагается следующее. Допустим, устройство измерения расстояния находится в точке $B_2(u_{B_2}, v_{B_2}, w_{B_2})$ системы $0uvw$, устройство B_2 то же что и выше по тексту. На рисунке 6 показано начальное положение объекта с устройством измерения в точке B_2 .

Рис. 6. Начальное положение объекта с устройством измерения в точке B_2

Устройство измерения установлено перпендикулярно боковой плоскости объекта и неподвижно относительно объекта, луч от B_2 параллелен отрезку d_0 в начальном положении и перпендикулярен границе пространства. Из рисунка расстояние d_{2H} это измеренное устройством B_2 значение луча от устройства до границы пространства.

На рисунке 6 введена точка Q_2 , являющаяся продолжением луча от точки B_2 и находящаяся в начальном положении в плоскости $0vw$ с ординатой и аппликаты как у точки B_2 , т. е. с координатами точки $Q_2(0, v_{B_2}, w_{B_2})$. Из рисунка 6 видно, что в начальном положении такого варианта d_0 (через точку B_2) состоит из двух слагаемых d_{2H} и d_{BQ} , где d_{2H} – расстояние, измеренное устройством B_2 , d_{BQ} – модуль разности абсцисс точек B_2 и Q_2 , абсцисса точки Q_2 равна 0, так что d_{BQ} равно модулю абсциссы (u_{B_2}) точки B_2 .

Если объект повернется вокруг оси w на 90° (и более) в одну или в другую сторону, то измерение расстояния будет до другой соответствующей стенки (границ параллелепипеда пространства). Поэтому рассмотрим измерение до стенки в условиях, когда углы (ω , ψ , θ) в пределах значений $< \pm 90^\circ$.

При поворотах объекта координаты точек B_2 и Q_2 в системе $0xuz$ изменяются в отличие от точки 0 системы $0uvw$. Как и выше по тексту представим повороты объекта и его точек B_2 и Q_2 , как последовательность поворотов на угол θ и затем на угол ω , поворот вокруг третьей оси на угол тангажа не меняет измеряемое расстояние d_0 . И в этом варианте расстояние d_0 до стенки можно определить со знанием угла курса θ и угла крена ω объекта, а также измеренного расстояния после поворотов объекта. Для этого варианта также необходимо рассмотреть расстояния после каждого поворота, формирующие прямоугольный параллелепипед с устройством измерения в точке B_2 . На рисунке 7 показаны расстояния после каждого поворота, формирующие прямоугольный параллелепипед с устройством измерения в точках 0 и B_2 . На рисунке 7а приведена копия рисунка 5 для того, чтобы легче анализировать и сравнивать с рисунком 7б. При обоих измерениях граница пространства (до которой измерения) одна и та же. Плоскость $0y_a z_a$, от которой ведется измерение расстояния из разных точек, одна и та же. Эта плоскость параллельна границе пространства, углы поворотов (θ и ω) те же. Направления лучей из точки 0 и из точки B_2 параллельны, поэтому значения длин отрезков (d_0 , d_ω , d_θ , $d_{\theta\omega}$, $s_{2\theta}$, $s_{2\omega}$) одинаковы для рисунка 7а и 7б.

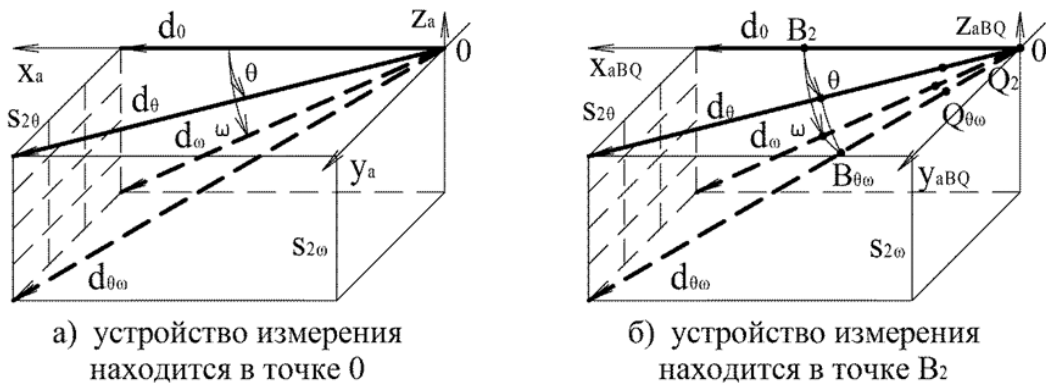


Рис. 7. Расстояния после каждого поворота, формирующие прямоугольный параллелепипед с устройством измерения в точках 0 и B₂

На рисунке 7б показаны положения точек B₂ и Q₂ в начале и после обоих поворотов, после любого поворота абсцисса точки Q₂ уже не будет нулевой. Из точек B₂ и Q₂ после поворотов на отрезке $d_{\theta\omega}$ сформированы точки B_{θω} и Q_{θω}.

В этом варианте на рисунке 7б каждое расстояния ($d_{\theta\omega}$, d_{ω} , d_{θ}) состоит из трех слагаемых. Слагаемые для расстояния $d_{\theta\omega}$ это измеренное расстояние d_{2H} , расстояние d_{BQ} и расстояние $d_{Q\theta\omega}$, образованное после поворотов точки Q₂:

$$d_{\theta\omega} = d_{2H} + d_{BQ} + d_{Q\theta\omega} = d_{2H} + |u_{B2}| + d_{Q\theta\omega}.$$

Расстояние $d_{Q\theta\omega}$ можно вычислить после каждого поворота точки Q₂, определяя изменения расстояния. На рисунке 8 показан поворот объекта вокруг оси z_a и вокруг оси y_a. Из рисунка 8а видно, что после поворота на угол θ следует продолжить отрезок B₂Q₂ до пересечения с плоскостью 0y_az_a для вычисления расстояния $d_{Q2\theta}$ от точки Q₂ до сформированной точки Q_{2θ}. В результате поворота на угол θ образована точка Q_{2θ} и изменение расстояния на $d_{Q2\theta}$ (рисунок 8а) с учетом знака ($v_{Q2} < 0$):

$$tg\theta = d_{Q2\theta} / (|v_{Q2}|) = d_{Q2\theta} / |v_{B2}|,$$

$$d_{Q2\theta} = |v_{B2}| \times tg\theta.$$

Из рисунка видно, что значение $d_{Q2\theta}$ в данном случае увеличивает расстояние $d_{\theta\omega}$. Из рисунка 8в видно, что после поворота на угол ω следует продолжить отрезок B₂Q_{2θ} до пересечения с плоскостью 0y_az_a для вычисления расстояния $d_{Q2\theta\omega}$ от точки Q_{2θ} до сформированной точки Q_{2θω}. В результате поворота на угол ω образована точка Q_{2θω} и изменение расстояния на $d_{Q2\theta\omega}$ (рисунок 8в).

Для расчетов из точки Q_{2θ} проведен перпендикуляр к оси y_a (рисунок 8в) и образована точка Q_n. Значение расстояния $d_{Q2\theta n}$ отрезка Q_{2θω}Q_n (при $w_{Q2} > 0$):

$$tg\omega = d_{Q2\theta n} / |w_{Q2}| = d_{Q2\theta n} / |w_{B2}|,$$

$$d_{Q2\theta\omega} = |w_{B2}| \times \operatorname{tg} \omega. \quad (10)$$

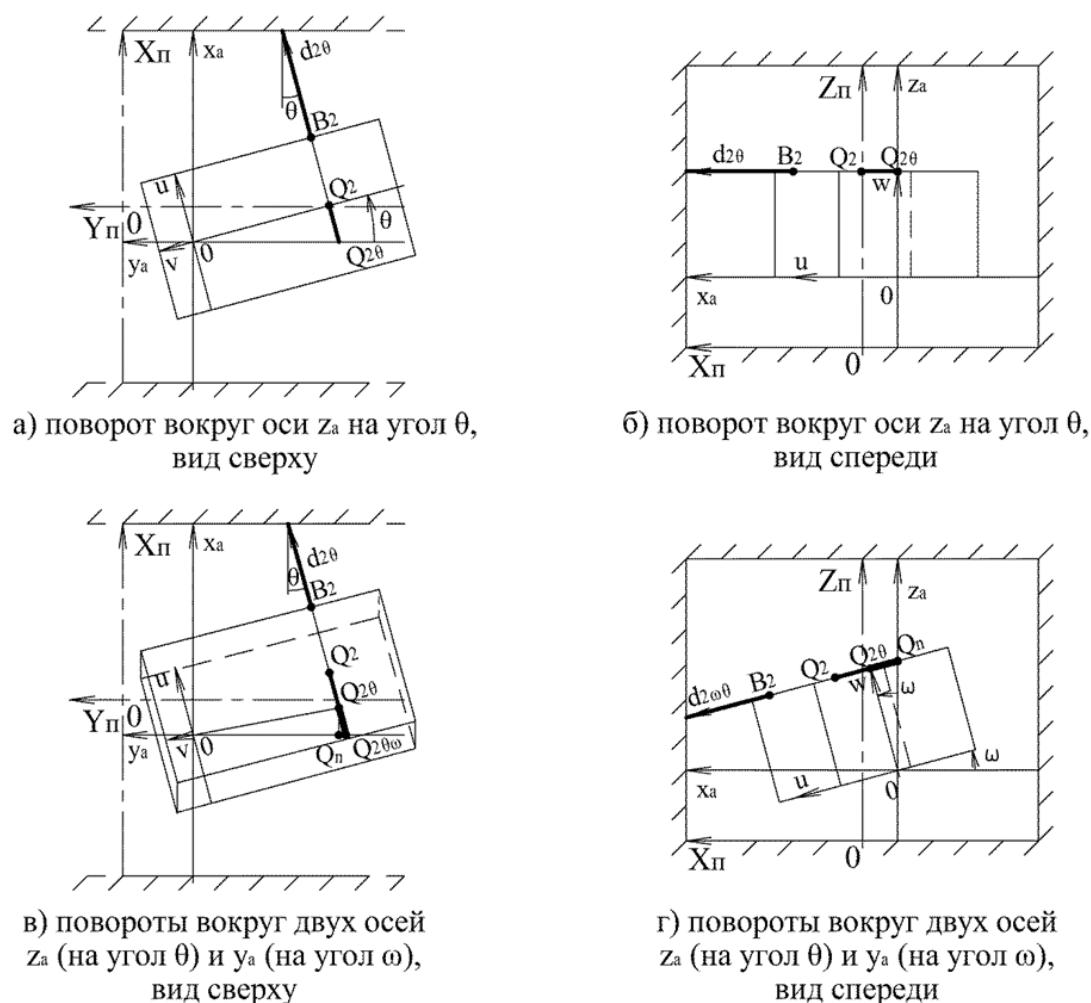


Рис. 8. Поворот объекта вокруг оси z_a и вокруг оси y_a

Из треугольника $Q_{2\theta}Q_{2\theta\omega}Q_n$ (рисунок 8в), зная $d_{Q2\theta\omega}$, изменение расстояния $d_{Q2\omega}$ на:

$$\cos \theta = d_{Q2\theta\omega} / d_{Q2\omega},$$

$$d_{Q2\omega} = d_{Q2\theta\omega} / \cos \theta = |w_{B2}| \times \operatorname{tg} \omega / \cos \theta. \quad (11)$$

Из рисунка видно, что значение $d_{Q2\omega}$ в данном случае увеличивает расстояние $d_{\theta\omega}$. В результате поворотов на угол θ и на угол ω расстояние $d_{Q\theta\omega}$ будет:

$$d_{Q\theta\omega} = d_{Q2\theta} + d_{Q2\omega} = |v_{B2}| \times \operatorname{tg} \theta + |w_{B2}| \times \operatorname{tg} \omega / \cos \theta. \quad (12)$$

Зная $d_{Q\theta\omega}$, можно определить $d_{\theta\omega}$:

$$d_{\theta\omega} = d_{2II} + |u_{B2}| + |v_{B2}| \times \operatorname{tg} \theta + |w_{B2}| \times \operatorname{tg} \omega / \cos \theta.$$

Зная $d_{\theta\omega}$ и углы θ и ω , по формуле (7) можно определить d_0 . Повороты могут не только увеличивать значения расстояния, но и уменьшать. Рассмотрим вариант при обратном направлении поворотов на угол $-\theta$ и угол $-\omega$. На рисунке 9 показан поворот объекта вокруг оси z_a и вокруг оси y_a в отрицательном направлении.

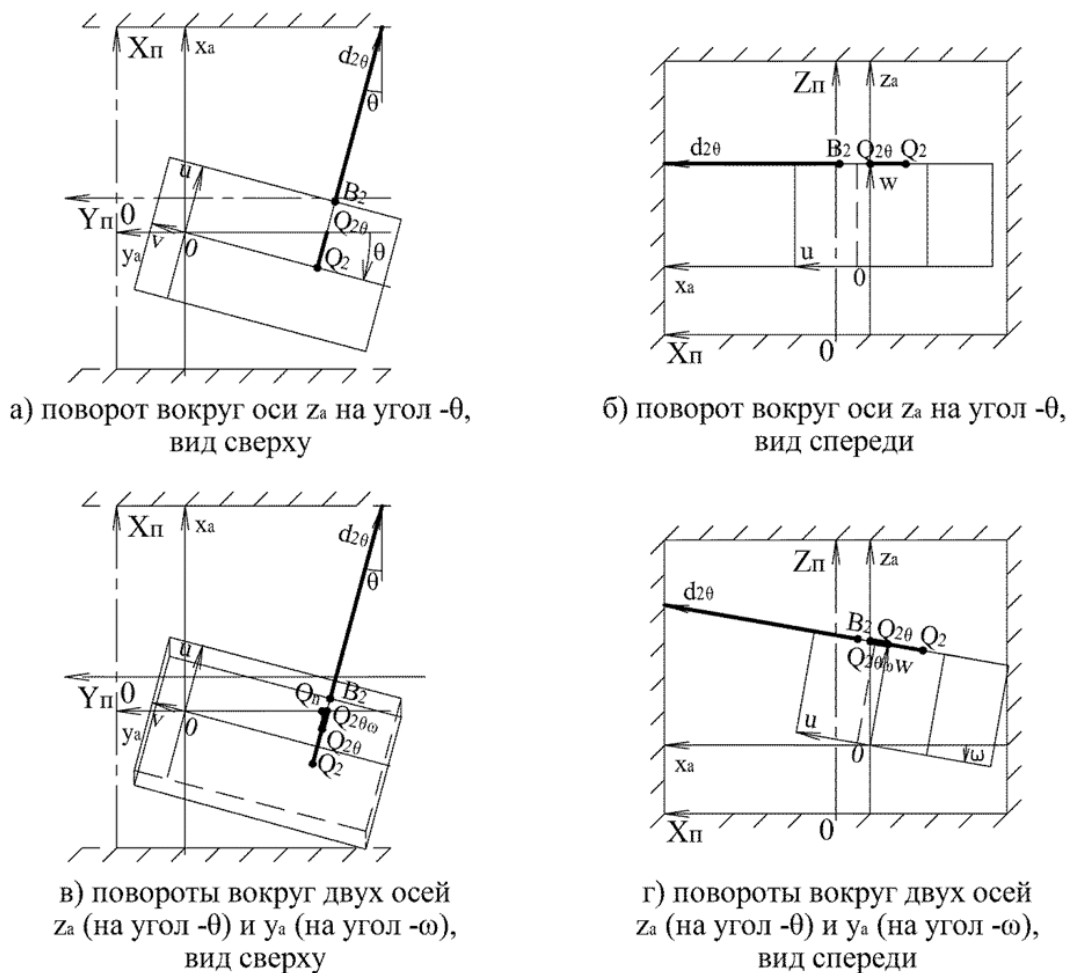


Рис. 9. Поворот объекта вокруг оси z_a и вокруг оси y_a

На рисунке 9 также показаны положения точек B_2 и Q_2 в начале и после обоих поворотов, абсцисса точки Q_2 также уже не будет нулевой. Из рисунка 9а видно, что после поворота на угол $-\theta$ повернутый отрезок B_2Q_2 пересекает плоскость $0y_a z_a$, поэтому точка $Q_{2\theta}$ находится между точками B_2 и Q_2 . В результате поворота на угол $-\theta$ образована точка $Q_{2\theta}$ и изменение значения расстояния на $d_{Q_{2\theta}}$ (рисунок 9а) с учетом знака угла $(-\theta)$:

$$d_{Q_{2\theta}} = |v_{B_2}| \times \operatorname{tg}(-\theta) = -|v_{B_2}| \times \operatorname{tg}\theta.$$

Из рисунка и формулы (12) видно, что значение $d_{Q_{2\theta}}$ в данном случае уменьшает расстояние $d_{\theta\omega}$.

Из рисунка 9в, 9г видно, что после поворота на угол $-\omega$ повернутый отрезок $B_2Q_{2\theta}$ пересекает плоскость $0y_a z_a$, поэтому точка $Q_{2\theta\omega}$ находится между точками B_2 и $Q_{2\theta}$. В результате поворота на угол $-\omega$ образована точка $Q_{2\theta\omega}$ и изменение значения

расстояния на $d_{Q2\theta\omega}$ (рисунок 9г) с учетом знака угла $(-\theta)$. Для расчетов из точки $Q_{2\theta}$ проведен перпендикуляр к оси y_a (рисунок 9в) и образована точка Q_n . Значение расстояния $d_{Q2\omega}$ отрезка $Q_{2\theta\omega}Q_n$ (при $w_{Q2}>0$) также по формуле (8), значение расстояния $d_{Q2\omega}$ отрезка $Q_{2\theta\omega}Q_{2\theta}$ по формуле (9). Из рисунка и формулы (12) видно, что значение $d_{Q2\theta}$ в данном случае уменьшает расстояние $d_{\theta\omega}$.

Если учитывать направление поворота, т. е. знак каждого угла θ и ω в формулах (6), (10), то они применимы для любого направления курса.

Определение расстояние d_0 до стенки. Входные данные: измеренное устройством В2 расстояние d_{2H} до стенки; вычисленный угол курса θ ; вычисленный угол крена ω ; координаты устройства В2 в системе координат $0uvw$. Расстояние d_0 вычисляется по формуле (11), затем по формуле (7).

При управлении объектом задается местонахождение объекта в пространстве. Заданное и фактическое расстояние по координатам могут отличаться из-за смещений объекта. Допустим, что заданное расстояние отсчитывается от оси y , оно от оси y до стенки численно равно D_{II} . Сравнивая D_{II} и d_0 и учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что x_0 – это смещение объекта по оси x , так что:

$$x_0 = D_{II} - d_0.$$

Аналогично определяются расстояние до другой (перпендикулярной первой) стенки и расстояние до верхней границы пространства (потолка или кровли). Смещение (y_0) объекта по оси y аналогично смещению (x_0) объекта по оси x . Для потолка смещение (z_0) объекта по оси z :

$$z_0 = H - h_0.$$

Выводы. Выведены формулы и показаны методы и методика расчета: угла курса θ объекта путем измерения расстояний до границ пространства; расстояния от повернутого объекта до границ ограниченного пространства; смещений (x_0 , y_0 , z_0) по трем осям.

В методических основах для позиционирования объекта управления (проходческого комбайна), разработаны очередные математические методы с применением необходимого математического аппарата. Приведенные методы (расчета углов поворота объекта, расчета расстояния от повернутого объекта) представляют часть методов, необходимых для полного управления объектом.

Полученные математические зависимости предназначены для корректной установки устройств измерения на объект. При начальной установке на объект устройств измерений с отклонениями по углу установки необходимо измерить углы отклонений и учитывать их в приведенных формулах или, если есть возможность, провести калибровку. Результаты являются математической основой для разработки программного обеспечения, реализующего функцию автоматического управления объектом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 №145.
2. Довгань, А. Ю. Метод позиционирования проходческого комбайна в условиях ограниченного пространства / А. Ю. Довгань, В. В. Казаков, А. Ю. Карповский // Материалы круглого стола «О путях и методах повышения производительности и эффективности использования оборудования в (горной) промышленности» (Донецк, 28 ноября 2024 г.). – Донецк: ГБУ «НИИВЭ», 2024. – С. 40-43.
3. Казаков, В. В. Метод позиционирования исполнительного органа проходческого комбайна в условиях ограниченного пространства / В. В. Казаков, А. Ю. Довгань, А. Ю. Карповский // Материалы круглого стола «О путях и методах повышения производительности и эффективности использования оборудования в (горной) промышленности» (Донецк, 29 мая 2025 г.). – Донецк: ГБУ «НИИВЭ», 2025. – С. 24-26.
4. Казаков, В. В. Математические методы вычисления углов крена и тангажа в зависимости от угла курса / В. В. Казаков, А. Ю. Карповский, А. Ю. Довгань // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 4. – С. 25-33. – DOI 10.5281/zenodo.18229668. – EDN AICQHS.

REFERENCES LIST

1. O strategii nauchno-tehnologicheskogo razvitiia Rossiiskoi Federatsii: Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 28.02.2024 №145.
2. Dovgan, A. Iu. Metod pozitsionirovaniia prokhodcheskogo kombaina v usloviiakh ogranichenного prostranstva / A. Iu. Dovgan, V. V. Kazakov, A. Iu. Karpovskii // Materialy kruglogo stola «O putiakh i metodakh povysheniia proizvoditelnosti i effektivnosti ispolzovaniia oborudovaniia v (gornoi) promyshlennosti» (Donetsk, 28 noiabria 2024 g.). – Donetsk: GBU «NIIVE», 2024. – S. 40-43.
3. Kazakov, V. V. Metod pozitsionirovaniia ispolnitelnogo organa prokhodcheskogo kombaina v usloviiakh ogranichenного prostranstva / V. V. Kazakov, A. Iu. Dovgan, A. Iu. Karpovskii // Materialy kruglogo stola «O putiakh i metodakh povysheniia proizvoditelnosti i effektivnosti ispolzovaniia oborudovaniia v (gornoi) promyshlennosti» (Donetsk, 29 maia 2025 g.). – Donetsk: GBU «NIIVE», 2025. – S. 24-26.
4. Kazakov, V. V. Matematicheskie metody vychisleniia uglov krena i tangazha v zavisimosti ot ugla kursa / V. V. Kazakov, A. Iu. Karpovskii, A. Iu. Dovgan // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 4. – S. 25-33. – DOI 10.5281/zenodo.18229668. – EDN AICQHS.

Поступила в редакцию 24.03.2026 г., рекомендована к изданию 13.04.2026 г.

METHOD FOR CALCULATING THE DISTANCE FROM A ROTATED OBJECT TO THE
BOUNDARIES OF A LIMITED SPACE

Kazakov V.V., Karpovskii A.IU., Dovgan A.IU.

The article proposes mathematical methods for calculating the distance from the origin of the object's coordinate system to the boundary of the space when the object is rotated and the measurement device is located at any point of the object and is stationary relative to the object. The calculated distances are used to calculate the course angle and the displacement of the object along the three axes for a given trajectory.

Keywords: mathematical methods, positioning, limited space, object, distance, angle, mining machine.

Казаков Василий Васильевич

старший научный сотрудник отдела автоматизации горных машин ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: oagm308@mail.ru

Kazakov Vasilii Vasilevich

Senior Researcher at the Department of Mining Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9340-3884>

Карповский Артур Юрьевич

заведующий отделом автоматизации горных машин ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: karpovsky.work@gmail.com

Karpovskii Artur IUrevich

Head of the Department of Automation of Mining Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0478-0182>

Довгань Александр Юрьевич

кандидат технических наук, директор ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова».
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: agm_osu@mail.ru

Dovgan Aleksandr IUrevich

Candidate of Technical Sciences, Director of Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov.
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7154-4513>

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

EDN AGAHRR
УДК 004.93`1

DOI 10.5281/zenodo.20799872

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА НЕЙРОСЕТЕВОГО РАСПОЗНАВАНИЯ СТУДЕНТОВ ПРИ ВХОДЕ В АУДИТОРИЮ ПУТЁМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИДЕОПОТОКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛИЦ ИЗ БАЗЫ ДАННЫХ

© 2026 *Федяев О.И., Суханов А.А.*

Статья посвящена автоматизации регистрации присутствия студентов на учебном занятии с помощью компьютерного зрения. Выполнена математическая постановка задачи компьютерного распознавания лиц с ориентацией на использовании предварительно обученной нейросети. Предложена функциональная схема системы, обеспечивающая распознавание лиц студентов в режиме реального времени с помощью свёрточной нейронной сети VGGFace16. В данной работе динамика процесса распознавания моделировалась с помощью специальных экспериментов на примере цветных фотографий 1680 человек. При моделировании световой поток с изображениями лиц, подаваемый на видеокамеру системы распознавания, генерировался отдельным компьютером, задающим различные варианты вычислительных экспериментов. Проведено исследование влияния размера датасета и динамики передачи лиц в видеопоток на точность распознавания. Оценки эффективности алгоритмов распознавания получены с помощью различных метрик качества. Систему видеоконтроля можно рекомендовать преподавателям образовательных учреждений.

Ключевые слова: компьютерное зрение, видеорегистрация студентов, видеопоток, свёрточная нейронная сеть, модель VGGFace16, распознавание лиц, метрики качества.

Введение. В работе рассматривается решение задачи автоматического контроля присутствия студентов в аудитории с помощью компьютерного зрения. Актуальность данной задачи обусловлена потерями времени преподавателя, которые возникают при ручной регистрации присутствия большого количества учащихся в аудитории в течение семестра. Основные трудности компьютерного распознавания лиц в реальном времени связаны со скоростью изменения изображений объектов в видеопотоке, положением, размером и ракурсом лица в кадре, освещением и различными видами помех [1].

В настоящее время большие перспективы в преодолении перечисленных проблем связывают с применением глубоких нейронных сетей. К этому классу относятся различные типы свёрточных нейронных сетей (Convolutional Neural Network) [2], которые являются развитием идей таких архитектур нейронных сетей, как многослойные сети типа когнитрон и неокөгнитрон. На данный момент свёрточная нейронная сеть (СНС) и её модификации считаются лучшими по точности и скорости распознавания объектов на изображении. Более того, распознавание лиц из видеопотока с камеры показывает, что нейронные сети с такой архитектурой способны быстро обрабатывать видеоданные даже в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Однако, для успешной идентификации личности важным вопросом является выбор архитектуры СНС, обеспечивающей необходимую скорость распознавания при использовании типового оборудования. Подробное описание алгоритма компоновки архитектуры классической СНС (LeNet) и оценка точности распознавания лиц приводится в работе [3]. Но в ней отсутствуют данные о структуре датасет и времени

обучения настраиваемой нейросети в реальных условиях, а также алгоритм синтеза нейросети носит эвристический характер. В работе [4] для решения задачи распознавания используются черты лица студентов для определения уровня внимания учащегося с помощью двух алгоритмов кодирования: Viola-Jones и Sobel Edge. Предложенный подход ориентирован только на онлайн-занятия. Проблеме автоматизации контроля посещения студентами учебных занятий посвящена работа [5], в которой для распознавания используется статистический метод главных компонент – алгоритм распознавания Eigenface. Данный алгоритм является простым, но он чувствителен к уровню освещённости и у него слабая дискриминация между классами.

Поэтому целью данной работы является оценка эффективности применяемой архитектуры нейросети в комплексе с другими блоками системы в реальных условиях видеоконтроля. То есть, предметом проводимых исследования является оценка влияния на качество распознавания следующих ключевых факторов:

- размер базы данных распознаваемых людей;
- число изображений, хранящихся в базе данных для конкретного человека;
- скорость движения человека перед видеокамерой;
- технические параметры компьютера и видеокамеры.

Математическая постановка задачи компьютерного распознавания лиц.

Пусть имеется множество фамилий распознаваемых людей (L). Им может быть список студентов в группе. Для каждого студента по фамилии $l_j \in L$ подготовлена одна или несколько фотографий, которые в совокупности образуют множество X изображений лиц $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, ($x_i \in X$).

Желательно иметь такую функцию f :

$$f : X \rightarrow Y ,$$

которая для каждого изображения x_i может определить соответствующий вектор характерных (уникальных для x_i) значений признаков $y_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$, где Y – множество векторов признаков, $y_i \in Y$, p_{ij} – значение признака, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, n – количество признаков. Мощности этих множеств удовлетворяют следующим соотношениям:

$$|X| \geq |L|, |X| = |Y|.$$

Распознаваемые классы (фамилии l_j) легко сгруппировать экспертным путём с помощью объединения изображений лиц x_i , относящихся к одному человеку:

$$l_1 = \{x_1, \dots, x_{m_1}\}, l_2 = \{x_{m_1+1}, \dots, x_{m_1+m_2}\}, \dots, l_k = \{x_{m_{k-1}+1}, \dots, x_m\} ,$$

или по векторам признаков y_i , учитывая функциональную связь $y_i = f(x_i)$:

$$l_1 = \{y_1, \dots, y_{m_1}\}, l_2 = \{y_{m_1+1}, \dots, y_{m_1+m_2}\}, \dots, l_k = \{y_{m_{k-1}+1}, \dots, y_m\} ,$$

где j – номер студента в списке группы, $j = \overline{1, k}$, $k = |L|$, $X = \bigcup_{j=1}^k l_j$, $m = m_1 + m_2 + \dots + m_k$, $m = |X|$.

В результате можно сформировать базу данных V для распознавания (классификации) людей по фотографиям лиц, которая будет представлена реляционной таблицей из следующих триад: фамилии, фотографии и вектора признаков:

$$V = \{(l_j, x_i, y_i) \mid l_j \in L, x_i \in X, y_i = f(x_i), j = \overline{1, k}, i = \overline{1, m}\}.$$

В i -ой строке таблицы V для всех пар (x_i, y_i) , которые принадлежат одному классу, будет стоять одна метка класса – соответствующая этой паре фамилия l_j . При настройке системы на конкретных людей необходимо с помощью функции f предварительно получить для каждой фотографии x_i соответствующий вектор признаков y_i и занести их в базу данных V .

В режиме распознавания система компьютерного зрения должна из видеопотока для локализованного изображения $\bar{x}$ лица человека выделить с помощью функции f вектор признаков $\bar{y} (f: \bar{x} \rightarrow \bar{y})$, а затем с его помощью найти в базе данных V наиболее похожий вектор признаков y_i и из найденной триады (l_j, x_i, y_i) извлечь соответствующую фамилию распознанного человека l_j :

$$l_j = \min_{(i=\overline{1, m}) \& (y_i \in Y) \& ((l_j, x_i, y_i) \in V)} \|y_i - \bar{y}\|,$$

где l_j – фамилия человека, распознанного системой по введенному из видеопотока изображению лица $\bar{x} (l_j \in L)$; $\|\cdot\|$ – мера косинусного сходства двух векторов.

Следовательно, задача заключается в том, чтобы определить функцию f , на которой основана рассмотренная идея распознавания образов.

Функциональная схема системы видеоконтроля студентов. Основные этапы видеорегистрации студентов по изображениям лиц из видеопотока представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Функциональная схема видеорегистрации студентов при входе в аудиторию

Обработка видеопотока выполняется программными модулями библиотеки OpenCV [6]. В кадре обнаруживаются и локализуются лица с помощью алгоритма Виолы-Джонса [7], который трактует лицо как совокупность пикселей. В результате формируется последовательность изображений лиц, поступающих на распознавание.

Каждое локализованное лицо передаётся в следующий блок, реализующий ключевую для распознавания функцию $f: X \rightarrow Y$. В данной работе это нейросетевая

функция, которая представлена свёрточной нейронной сетью VGGFace16. Она ставит в соответствие каждому лицу $x \in X$ вектор признаков $y \in Y (y = f(x))$, который отображает характерные особенности лица.

На этапе настройки системы необходимо заранее подготовить базу данных V для всех распознаваемых людей, идентифицируемых по фамилиям из множества L . Для каждого снимка $x \in X$ (X – набор подготовленных фотографий) с помощью функции f строится триада (l, x, y) , где $y = f(x)$ – признаковый вектор, l – фамилия человека ($l \in L$). Все триады сохраняются в базе данных V .

В режиме распознавания блок сравнения вычисляет косинусное сходство между векторами признаков распознаваемого лица $\bar{y}$ и каждым вектором-эталоном y из базы V :

$$\text{Сходство} = \frac{y \bullet \bar{y}}{\|y\| \bullet \|\bar{y}\|},$$

где $y \bullet \bar{y}$ – скалярное произведение векторов с размерностью $n = 2622$; $\|y\|$ и $\|\bar{y}\|$ – евклидовы нормы. Решение о соответствии принимается, если полученный коэффициент сходства превышает установленное пороговое значение (в данной работе – 0,7).

Нейросетевая реализация распознавательной функции. Учёные Оксфордского университета создали специально для распознавания лиц глубокую свёрточную сеть VGGFace16, с помощью которой была реализована ключевая функция f [8]. Как показано на рисунке 2, сеть имеет многослойную структуру, где чередуются свёрточные слои и слои субдискретизации (пулинг).

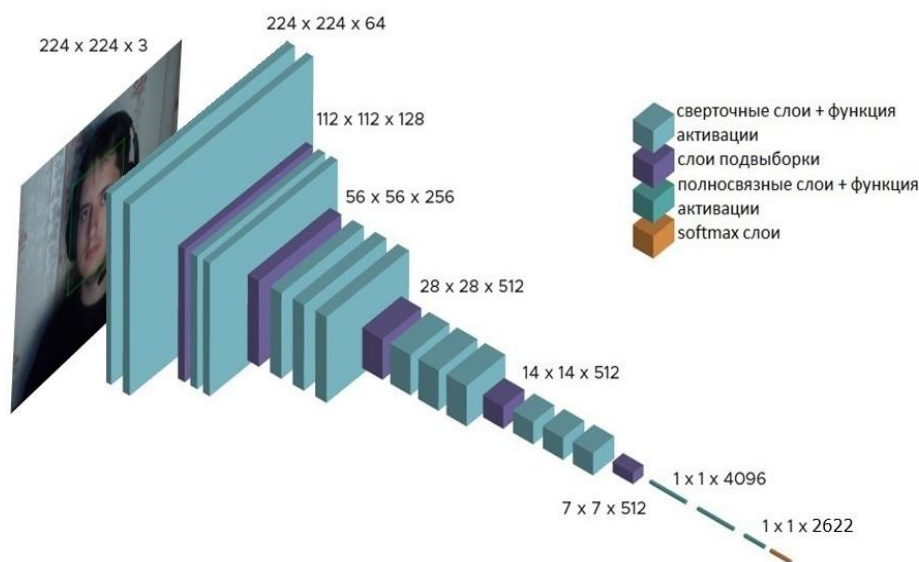


Рис. 2. Структура предварительно обученной многослойной свёрточной нейронной сети VGGFace

В каждый слой включены несколько карт признаков, причём нейроны внутри одной карты используют одинаковые весовые коэффициенты для соединения с локальными участками предыдущего слоя. Изображение сканируется небольшим окном с фиксированным ядром свёртки, и результат сканирования становится выходом нейронов текущего слоя. Каждое ядро создаёт отдельную карту, выделяющую

определённые признаки, например, углы, границы и т. д. Такой набор карт позволяет каждой плоскости обнаруживать характерные для неё фрагменты независимо от их расположения в предыдущем слое.

Входом $X^{(0)}$ для этой нейросети является цветное изображение (в формате RGB), которое представляет собой трёхмерный тензор размером $224 \times 224 \times 3$ (высота, ширина, канал цвета). Цветные каналы свёртываются по отдельности с использованием одного и того же ядра, а затем результаты складываются вместе, используя матричное суммирование.

Структурный анализ свёрточной нейронной сети позволил представить её в виде компактной параметрической модели. На теоретико-множественном уровне такая модель для одного цветового канала была описана в виде следующего кортежа:

$$C = \langle \{C_1\}, P_1, \{C_2\}, P_2, \{C_3\}, P_3, \{C_4\}, P_4, \{C_5\}, P_5, K_1, K_2, K_3 \rangle,$$

где $\{C_1\}$ – множество из двух слоёв свёртки типа C_1 ; $\{C_2\}$ – множество из двух слоёв свёртки типа C_2 ; $\{C_3\}$ – множество из трёх слоёв свёртки типа C_3 ; $\{C_4\}$ – множество из трёх слоёв свёртки типа C_4 ; $\{C_5\}$ – множество из трёх слоёв свёртки типа C_5 . Типы слоёв свёртки с их характеристиками приведены в таблице 1.

Таблица 1. Кортежи типовых свёрточных слоёв нейросети в пределах блока

Тип слоя свёртки	Количество плоскостей	Размер фильтра	Шаг	Параметры модели нейронов			
				ϕ	b	W	Y
C_1	64	3×3	1	ReLU	64	$3 \times 3 \times 64$	$224 \times 224 \times 64$
C_2	128	3×3	1	ReLU	128	$3 \times 3 \times 128$	$112 \times 112 \times 128$
C_3	256	3×3	1	ReLU	256	$3 \times 3 \times 256$	$56 \times 56 \times 256$
C_4	512	3×3	1	ReLU	512	$3 \times 3 \times 512$	$28 \times 28 \times 512$
C_5	512	3×3	1	ReLU	512	$3 \times 3 \times 512$	$14 \times 14 \times 512$

Типы слоёв пулинга P_i и многослойного классификатора K_i с их характеристиками приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Кортежи типовых пулинг слоёв нейросети в пределах блока

Тип слоя пулинга	Количество плоскостей	Размер фильтра	Шаг	Параметры модели нейронов			
				ϕ	b	W	Y
P_1	64	2×2	2	max	64	$2 \times 2 \times 64$	$112 \times 112 \times 64$
P_2	128	2×2	2	max	128	$2 \times 2 \times 128$	$56 \times 56 \times 128$
P_3	256	2×2	2	max	256	$2 \times 2 \times 256$	$28 \times 28 \times 256$
P_4	512	2×2	2	max	512	$2 \times 2 \times 512$	$14 \times 14 \times 512$
P_5	512	2×2	2	max	512	$2 \times 2 \times 512$	$7 \times 7 \times 512$

Таблица 3. Кортежи слоёв нейронов полносвязного классификатора

Тип слоя классификатора	Параметры модели нейронов			
	ϕ	b	W	Y
K_1	ReLU	4096	25088×4096	4096
K_2	ReLU	4096	4096×4096	4096
K_3	ReLU	4096	4096×2622	2622

Проведенный параметрический анализ описывает статический аспект СНС VGGFace16. Он выявил и упорядочил основные структурные элементы сети. Но они не отражают поведенческий аспект, т.е. функциональное взаимодействие слоёв нейронной сети. Рассмотрим основные функциональные связи СНС. Извлечение пространственных

признаков во входных данных осуществляется свёрточными слоями через серию фильтров (ядер). Для нейронов одной плоскости с фиксированным ядром размером $(T \times U)$ дискретная двумерная свёртка определяется выражением:

$$Y_{i,j}^m = \varphi \left(\sum_t \sum_u Y_{i+t,j+u}^{m-1} \times W_{t,u}^m + b^m \right),$$

где $Y_{i,j}^m$ – выходное значение нейрона свёрточного слоя m на позиции (i, j) в одном из цветовых каналов; $W_{t,u}^m$ – ядро свёртки (тензор 2-го ранга для одной плоскости или тензор 3-го ранга для всех плоскостей слоя m); $Y_{i+t,j+u}^{m-1}$ – выходные сигналы нейронов в пределах ядра предыдущего слоя (тензор 3-го ранга для всех плоскостей одного слоя); m – номер слоя ($1 \leq m \leq M$, M – количество слоёв свёртки и пулинга, $M = 18$); b^m – смещение нейрона; φ – функция активации ReLU ($\varphi(g) = \max(0, g)$).

Слой пулинга (подвыборки) служит для понижения размерности карт признаков, полученных от свёрточного слоя, при этом сохраняя наиболее значимые особенности изображения. Это ускоряет вычисления и сокращает число признаков, что помогает избежать переобучения модели. Для этого карта признаков разбивается на непересекающиеся квадратные области, и в каждой такой области выбирается максимальное значение – так работает операция max-pooling. Данный подход обеспечивает локальную инвариантность: малые изменения в пределах локального участка не влияют на результат, что делает выделяемые признаки менее чувствительными к шумам во входных данных. Ниже приведена математическая запись этой операции:

$$Y_{i,j}^m = \varphi \left(Y_{\bar{i}+t, \bar{j}+u}^{m-1} \right) = \max_{(t,u) \in pool} \left(Y_{\bar{i}+t, \bar{j}+u}^{m-1} \right),$$

где $Y_{i,j}^m$ – выходной сигнал нейрона на позиции (i, j) в плоскости слоя m подвыборки; $Y_{\bar{i}+t, \bar{j}+u}^{m-1}$ – входные значения для функции $\max$, т. е. это выходные сигналы нейронов в окрестности вычисляемой позиции $(\bar{i}, \bar{j})$ в соответствующей плоскости предыдущего свёрточного слоя ($\bar{i} = 2 * i$, $\bar{j} = 2 * j$); $pool$ – область объединения размером $(T \times U)$ в свёрточной плоскости, вычисляемой по координатам (i, j) в пределах соседней плоскости слоя подвыборки.

Три последних полносвязных слоя завершают решение задачи классификации. Их структура и связи совпадают с традиционным многослойным персептроном. В полносвязном слое каждый нейрон соединен с каждым нейроном предыдущего слоя. Эти связи представлены весовыми коэффициентами W^m и смещением b^m , которые настраиваются при обучении модели. Значения сигналов на выходе одного слоя m ($19 \leq m \leq 21$) персептрона определяются с помощью следующей формулы:

$$Y_i^m = \left(\sum_{j=1}^{p_m} W_{j,i}^m \times Y_j^{m-1} + b_i^m \right),$$

где Y_i^m – выходные сигналы нейронов в слое m персептрона ($19 \leq m \leq 21$); Y_j^{m-1} – входные сигналы, т. е. выходы нейронов предыдущего слоя; i – номер нейрона в слое m персептрона ($1 \leq i \leq v_m$); v_m – количество выходных сигналов у нейронов слоя m ,

$v_m = (4096, 4096, 2622)$; p_m – количество входных сигналов для нейронов слоя m , $p_m = (25088, 4096, 4096)$; φ – нелинейная функция активации ReLU.

Последний выходной слой нейросети VGGFace16 осуществляет многоклассовую классификацию распознаваемых лиц. Поэтому выходные сигналы этого слоя должны представлять распределение вероятностей принадлежности к разным классам. Удобным преобразователем выходных сигналов персептрона в вероятность, соответствующую различным классам, будет вычислитель с функцией softmax:

$$\text{softmax}(Y)_k = \frac{e^{Y_k}}{\sum_{j=1}^K e^{Y_j}},$$

где Y – вектор необработанных выходных сигналов нейронов последнего слоя персептрона ($m = 21$); K – количество классов ($K = 2622$ лиц); k – запись с таким номером в выходном векторе $\text{softmax}(Y)$ интерпретируется как прогнозируемая вероятность того, что распознаваемое лицо относится к классу k [9].

Видеорегистрация студентов при входе в аудиторию. Программная реализация системы выполнена на Python с фреймворком Qt5, СУБД SQLite и библиотеками NumPy, OpenCV, Keras, Hickel. Преподаватель с помощью оконного интерфейса имеет возможность наблюдать за видеорегистрацией и корректировать данные о студентах по разным дисциплинам в течение семестра (рисунок 3).

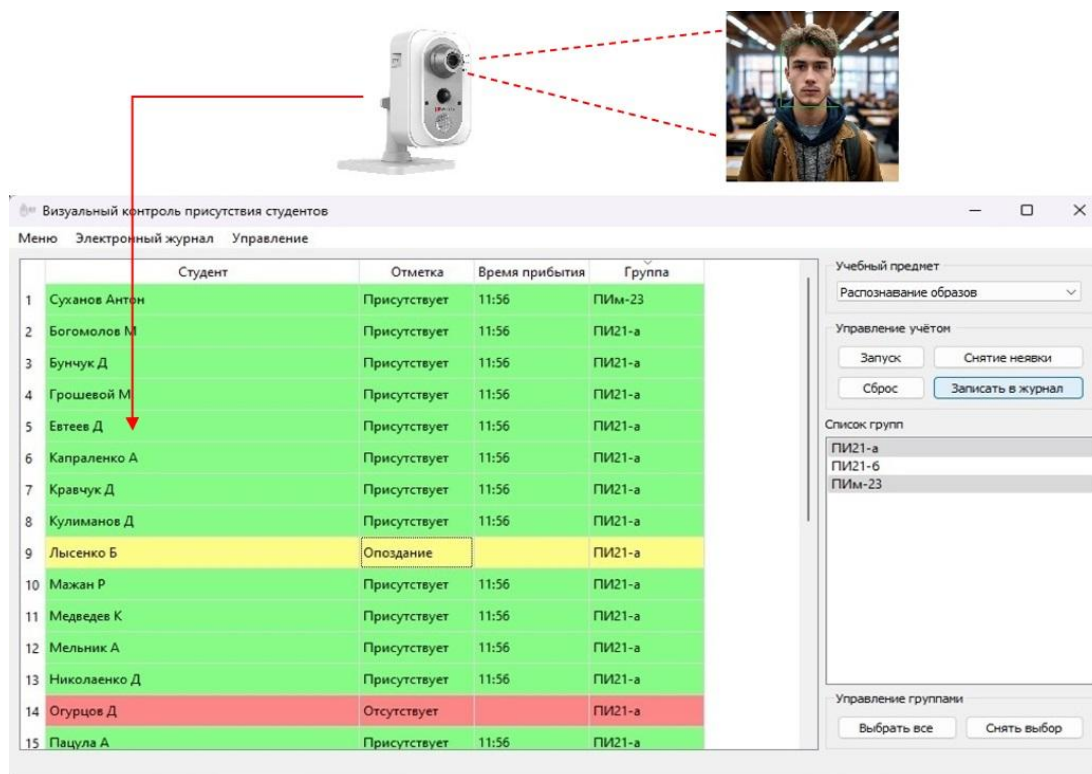


Рис. 3. Оконный интерфейс преподавателя при видеорегистрации студентов

Левая часть окна представляет собой таблицу со студентами группы. Система автоматически регистрирует время прихода и состояние каждого студента (не отмечен, прибыл, опоздал, отсутствует), а цвет строки сигнализирует о статусе. На иллюстрации

показан процесс фиксации посещаемости по курсу «Распознавание образов». Правая часть окна содержит элементы управления: выбор предмета, кнопки запуска/остановки распознавания, включения режима опоздания, сброса и завершения занятия, записи данных в журнал.

При запуске программы и выбора группы по умолчанию все студенты имеют статус «Не отмечен», после распознавания статус меняется на «Присутствует». При переходе в режим опоздания неотмеченные студенты получают статус «Отсутствует», а те, кого система распознаёт в этом режиме – «Опоздание». Сохранение данных в журнал возможно только из режима опоздания, что исключает попадание статуса «Не отмечен» в итоговую ведомость. Ячейки таблицы с отметками окрашиваются по значению и могут редактироваться через выпадающий список меню.

Дополнительное окно введено для формирования базы данных, с помощью которого заносятся фамилии студентов ($l \in L$) и их фотографии ($x \in X$). Все снимки нормализуются до размера 224×224 пикселя (RGB). Электронный журнал – это реляционная таблица с полями: фамилия, дата, предмет, группа, отметка.

Оценка качества распознавания по фотографиям из личных дел студентов. Вполне очевидно в первую очередь следовало бы проверить насколько фотографии из личных дел студентов (формат 3×4), которые доступны в университете, позволяют надёжно идентифицировать людей в потоке. Такой эксперимент проводился на 70 студентах с одним снимком у каждого [10]. Исследовалось влияние различных помех на качество распознавания. Однако из-за ограниченного объёма данных получить объективные и полные оценки не удалось. Схема эксперимента была следующей: цветные JPG-изображения печатались на бумаге размером $5,29 \times 4,23$ см, а затем снимались видеокамерой. Точность распознавания не превысила 84% из-за низкого разрешения и малого количества эталонных снимков. Отсюда сделан вывод, что для успешного видеоконтроля необходимы более качественные фотографии, отражающие возможные изменения масштаба и ракурса лица.

Приведённые ограничения не позволили всесторонне оценить возможности нейросети VGGFace16, т. к. недостаточно было не только людей и их фотографий, но и качества самих изображений. С такими данными получить статистически правильные оценки невозможно. Поэтому в данном исследовании использована база лиц Массачусетского университета [11], которая содержит существенно более качественные снимки по сравнению с предыдущим датасетом [10]. Эта база включает цветные фотографии 1680 человек, при этом на каждого приходится от 2 до 50 изображений, сделанных с разных ракурсов. По нашему мнению, этот объём базы данных достаточен для проведения разных экспериментов и получения статистически обоснованных результатов.

Моделирование видеопотока изображений лиц из базы данных и оценка качества распознавания на основе метрик. Для приближения условий экспериментов к реальному процессу видеоконтроля студентов был образован технический комплекс из двух ПК (рис. 4).

Первый компьютер является основной, на котором установлена система распознавания лиц и подключена веб-камера. Камера направлена на монитор второго компьютера и удалена от него на 1 м. Её параметры: разрешение 1280×720 пикселей, CMOS-матрица, автоматическая фокусировка, частота до 30 fps.

Конфигурация ПК: процессор Intel Core i5-9400F (2,90 ГГц), 16 ГБ оперативной памяти, 64-разрядная ОС Windows, видеокарта NVIDIA GeForce RTX 4060 TI.

Второй компьютер служит генератором тестовых изображений. На нём запускается PowerPoint-презентация с фотографиями людей, что позволяет создавать световой поток снимков из разных баз данных распознаваемых лиц. Комплекс позволяет показывать фотографии с разной частотой и с любым количеством фотографий одного человека.

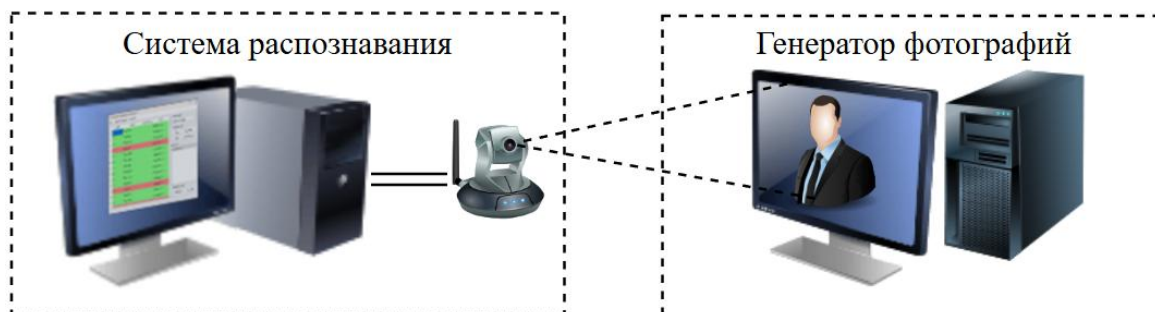


Рис. 4. Генерация светового потока с изображениями лиц для экспериментальной оценки качества распознавания

Для анализа чувствительности системы использовался ряд метрик качества [12]:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad F1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall},$$

где TP (True Positive) – верно распознанные «свои»; TN (True Negative) – верно отвергнутые «чужие»; FP (False Positive) – «чужие», ошибочно принятые за «своих»; FN (False Negative) – «свои», ошибочно отвергнутые.

Исследование влияния размера датасет и динамики передачи лиц в видеопоток на точность распознавания. Все последующие опыты выполнялись на ранее описанной платформе (рис. 4). Для моделирования реального процесса появления студентов в аудитории использовался второй компьютер. Его экран, удалённый от видеокамеры системы на 1 метр, служил источником светового потока – на нём искусственно воспроизводилась последовательность фотографий распознаваемых людей. Смена кадров происходила каждые 3 секунды с помощью специально подготовленной PowerPoint-презентации. Так, презентация для 25 человек длилась 75 секунд (25 фотографий × 3 с.). Видеокамера, работающая независимо с частотой 30 кадров/с, захватывала этот экран и передавала поток изображений лиц на вход системы распознавания.

Первый эксперимент использовал «облегчённые» входные данные – фотографии из обучающей выборки. Система обучалась на четырёх базах разного объёма, каждая из которых содержала ровно одно изображение на человека (такие датасеты в дальнейшем будем называть «однозначными»). Задача состояла в оценке влияния размера «однозначного» датасета на точность распознавания «своих» лиц.

Из «однозначных» датасетов были подготовлены 4 презентации, моделирующие вход групп из 25, 50, 75 и 100 студентов. Во всех четырёх случаях система распознала всех людей без ошибок. При имитации самой большой группы, в 100 человек, было обнаружено, что система иногда выделяет несколько фотографий, для которых коэффициент сходства превышает порог 0,7. Эти снимки соответствовали людям с

внешне похожими лицами, что свидетельствует о корректной работе нейросети в выделении характерных признаков (рис. 5).



Рис. 5. Пример фотографий похожих лиц (фотографии взяты из публичного датасета)

Во втором эксперименте условия были изменены в сторону усложнения распознавания. Техническая платформа, перечень распознаваемых людей и обучающие «однозначные» датасеты остались прежними. Однако содержание и структура входных фотографий претерпели два важных изменения.

Во-первых, на систему распознавания по-прежнему проецировались фотографии из авторизованного списка, но эти изображения уже не присутствовали в обучающей выборке. Во-вторых, в PowerPoint-презентацию были добавлены фотографии новых людей, которых не было в «однозначных» базах. Например, для датасета размером 25 человек в презентацию включалось ещё 5 посторонних лиц. Это позволило повысить репрезентативность набора потенциальных входных изображений. Вычисленные метрики качества распознавания для «однозначных» датасетов представлены в таблице 4 и на рисунке 6.

Таблица 4. Значения метрик качества распознавания при использовании «однозначных» БД, участвующих в обучении

Количество людей: есть в БД / нет в БД	Исходы распознавания				Значения метрик			
	TP	TN	FP	FN	Acc	Prec	Rec	F1
25/5	21	4	1	4	0,833	0,955	0,840	0,894
50/10	41	7	3	9	0,800	0,932	0,820	0,872
75/15	64	10	5	11	0,822	0,928	0,853	0,889
100/20	87	11	9	13	0,817	0,906	0,870	0,887

Анализ метрик показывает, что объём обучающей выборки не является критическим фактором для точности работы нашей системы. В задаче видеоконтроля студентов особенно важна минимизация ложных срабатываний (FP) – высокая точность идентификации зарегистрированных лиц. По показателю Precision система демонстрирует хороший результат: 93% даже на «однозначном» датасете. Другой важный показатель – Ассигасу, отражающий долю правильно классифицированных изображений среди всех предъявленных (как знакомых системе, так и незнакомых). Среднее значение Ассигасу составляет 82%.

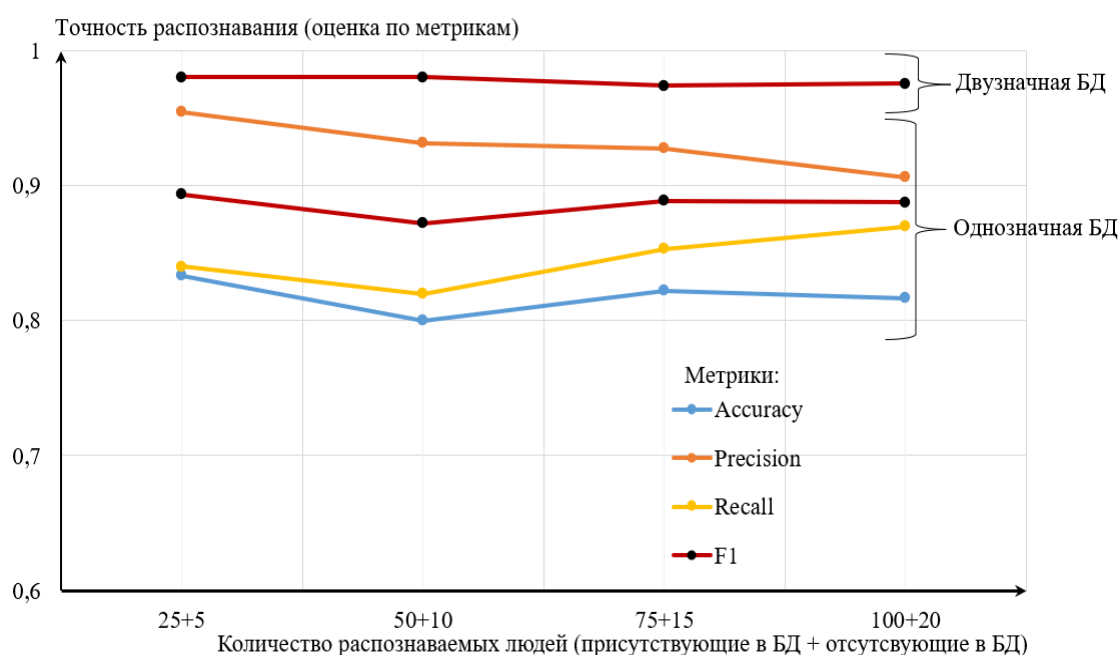


Рис. 6. Метрическая оценка качества распознавания людей на тестируемых наборах фотографий

Сбалансированная метрика F1 показывает что на «однозначных» датасетах (одно фото на человека) её среднее значение равно 89%. Однако при использовании «двузначных» датасетов (два фото на человека) значение F1 приближается к 98% (рис. 6). Это убедительно доказывает, что для обеспечения высокого качества распознавания обучающее множество должно содержать не менее двух изображений на каждого идентифицируемого человека.

В эксперименте с большими обучающими БД иногда возникали ложные распознавания (ошибки 1-го рода). Например, на рисунке 7 первое фото – это лицо человека, которого система должна была распознать, второе фото – это человек которого она распознала. Поэтому для похожих людей следует ещё больше увеличивать число фотографий с разными ракурсами, формами и размерами лица.



Рис. 7. Пример ошибки распознавания 1-рода (фотографии взяты из публичного датасета)

Третий эксперимент ориентирован на исследование синхронизации двух одновременно протекающих динамических процессов: длительности нахождения человека перед камерой и быстродействия системы распознавания (зависящего от вычислительных ресурсов, алгоритма и объёма базы). Для надёжной идентификации в реальном времени необходимо знать минимальное время, в течение которого лицо должно присутствовать в кадре, чтобы распознавание успело завершиться. Используемый двухкомпьютерный комплекс (рис. 4) позволяет имитировать движение людей перед камерой и оценивать точность работы нейросетевой системы на конкретном процессоре.

Все условия сохранены с предыдущего эксперимента, кроме интервала смены входных изображений на генераторе фотографий. Для имитации разной скорости входа людей в аудиторию интервал варьировался от 0,1 до 3 секунд. В каждом кадре фиксировалось только одно лицо. Применялись «двузначные» базы данных. Точность измерялась метрикой Recall.

Как показано на рисунке 8, при уменьшении интервала смены фотографий ниже 1 секунды точность резко падает (возрастает доля ложных отрицаний FN). Причина – «пропуск» некоторых изображений: время распознавания одного лица превышает интервал смены светового потока, и система физически не успевает обработать предыдущую фотографию.

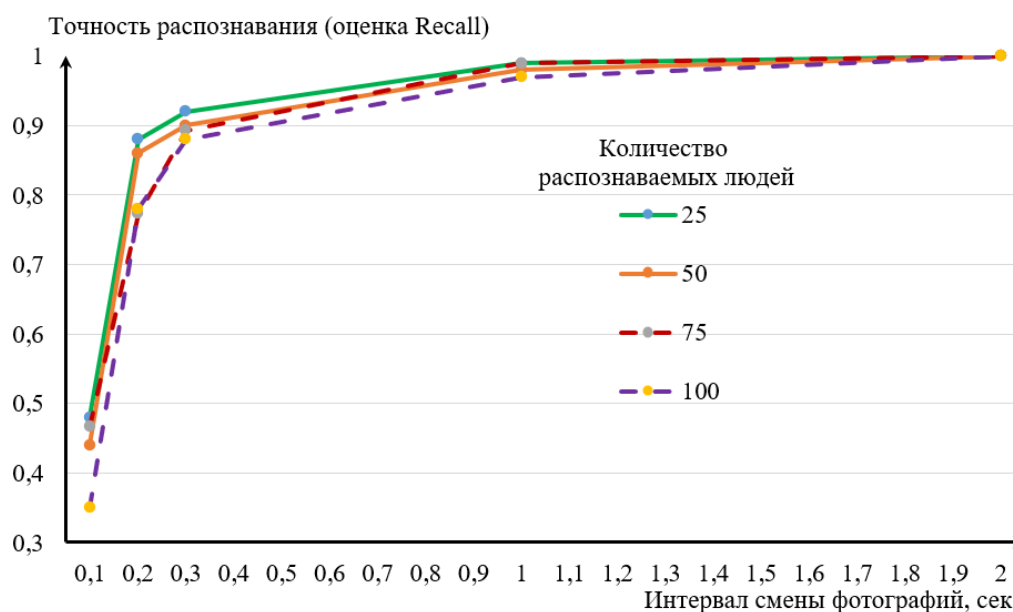


Рис. 8. Зависимость точности распознавания от скорости прохождения человека перед видеокамерой на разных объёмах тестируемых датасетов и используемых вычислительных ресурсов

Из результатов этого эксперимента следует, что для надёжной работы рассмотренной системы распознавания в реальном времени необходимо, чтобы каждый человек оставался в кадре не менее 1 секунды. Данное ограничение обусловлено техническими характеристиками использованного оборудования. Это требование должно быть выполнено при последующем тестировании системы в реальных условиях – в частности, при регистрации студентов, входящих в аудиторию.

Выводы. В работе представлена математическая постановка задачи распознавания лиц с опорой на предобученную нейронную сеть, что позволяет легко перенастраивать систему при замене распознаваемой группы людей. Разработана функциональная схема

видеорегистрации студентов при входе в аудиторию, предусматривающая поступление изображений лиц с камеры в реальном масштабе времени. Выполнено параметрическое и функциональное описание архитектуры используемой нейросети VGGFace16.

С помощью ряда экспериментов проведена комплексная оценка эффективности работы системы в условиях, приближенных к реальному процессу видеоконтроля посещаемости студентов. Для этого была построена техническая платформа на базе двух компьютеров, позволившая генерировать видеопоток с изменением скорости и содержания изображений лиц из различных баз данных и накапливать статистику для оценки качества распознавания на основе метрик.

В эксперименте с «облегченными» для распознавания входными данными, т. е. при распознавании по фотографиям из обучающего множества показана абсолютная точность узнавания на примере групп людей численностью 25, 50, 75 и 100 человек даже при использовании «однозначного» датасета.

Более «жестким» для системы был эксперимент с открытым набором входных данных. В него включались «усложненные» для распознавания входные данные: фотографии, которые не входили в обучающее множество, а также фотографии новых людей, отсутствующих в «однозначных» базах данных. На этих тестовых данных проведена метрическая оценка качества распознавания в зависимости от размера базы данных.

Метрики Precision и Accuracy подтвердили, что увеличение количества людей в базе данных не оказывает существенного негативного влияния на скорость и точность идентификации лиц. Это указывает на хорошую масштабируемость программной системы, т.е. на её способность успешно справляться с растущим объёмом обрабатываемых видеоданных. При использовании «однозначных» датасетов метрика Precision составила 93%, а сбалансированная метрика F1 снизилась до уровня 89%. Однако, при переходе на «двузначные» датасеты значение F1-меры увеличилось до 100%. Из этого следует, что минимальным требованием к хорошо настраиваемой базе лиц является наличие в ней минимум двух различных фотографий для каждого идентифицируемого студента.

Третий эксперимент установил, что минимальное время нахождения человека в зоне кадра, необходимое для правильного распознавания лица системой с указанными техническими характеристиками, равняется 1 секунде. При интервале смены кадров меньше 1 секунды система не успевает завершить цикл обработки, что приводит к пропуску кадров и резкому росту числа ложноотрицательных срабатываний.

Выполненные исследования свидетельствуют, что предложенная система успешно автоматизирует учёт присутствия студентов на лекциях с большой наполняемостью. Она накапливает в электронном журнале статистические данные по учебной дисциплине и по каждому обучающемуся в течение всего семестра. Благодаря компьютерному зрению система освобождает преподавателя от необходимости ручной регистрации учащихся и упрощает ведение журнала учёта.

Соблюдение законодательства по сохранению персональных данных обеспечивается путём получения письменных согласий от всех участников образовательного процесса.

Программный продукт может быть установлена на обычном ноутбуке преподавателя и использоваться не только для оперативного контроля посещаемости, но и как платформа для других функций мониторинга учебных занятий. Система рекомендуется к внедрению преподавателям высших учебных заведений, учителям школ и педагогам учреждений среднего профессионального образования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Goodfellow, I. Deep learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge, Mass.: MIT Press, 2016. – 802 p.
2. Gulli, A. Deep Learning with Keras : implement neural networks with Keras on Theano and TensorFlow / A. Gulli, S. Pal. – Birmingham: Packt Publishing, 2017. – 318 p.
3. Golikov, O. Y. Methods of the development of the architecture of the neural networks for identification and authentication of individuals / O. Y. Golikov, M. A. Ramos // Physical Sciences and Technology. – 2020. – Vol. 7, No. 3-4. – P. 44-49.
4. Ong, J. W. The application of image processing for monitoring student's attention level during online class / J. W. Ong, W. J. Chew, S. K. Phang // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2120, No. 1. – P. 012028
5. Puthea, Kh. The Attendance Marking System based on Eigenface Recognition using OpenCV and Python / Kh. Puthea, R. Hartanto, R. Hidayat // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1551, No. 1. – P. 012012.
6. Reading and Writing Images and Video [Электронный ресурс] // OpenCV 2.4.13.7 documentation. – URL: https://docs.opencv.org/2.4/modules/highgui/doc/reading_and_writing_images_and_video.html (дата обращения 14.01.2026).
7. Viola, P. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features / P. Viola, M. Jones // Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. CVPR 2001. – IEEE, 2001. – 8 p.
8. Simonyan, K. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition [Электронный ресурс] / K. Simonyan, A. Zisserman // arXiv. – 2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (дата обращения 15.02.2026).
9. Abdlkader, F. D. Design and analysis of face recognition system based on VGGFace-16 with various classifiers / F. D. Abdlkader, M. F. Ghanim // IAES International Journal of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 13, No. 2. – P. 1499.
10. Суханов, А. А. Исследование качества распознавания студентов по изображению лиц в системе видеоконтроля / А. А. Суханов, О. И. Федяев // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 23–25 октября 2024 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 210-214.
11. Face Recognition Dataset - Oneshot Learning [Электронный ресурс] // Kaggle. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/stoicstatic/face-recognition-dataset/data> (дата обращения 15.02.2026).
12. Khawaja Muhammad Fahd. Comparison of Evaluation Metrics used in Machine Learning Models [Электронный ресурс] // Educative. – URL: <https://www.educative.io/blog/evaluation-metrics-ml-models> (дата обращения 16.02.2026).

REFERENCES LIST

1. Goodfellow, I. Deep learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge, Mass.: MIT Press, 2016. – 802 p.
2. Gulli, A. Deep Learning with Keras : implement neural networks with Keras on Theano and TensorFlow / A. Gulli, S. Pal. – Birmingham: Packt Publishing, 2017. – 318 p.
3. Golikov, O. Y. Methods of the development of the architecture of the neural networks for identification and authentication of individuals / O. Y. Golikov, M. A. Ramos // Physical Sciences and Technology. – 2020. – Vol. 7, No. 3-4. – P. 44-49.
4. Ong, J. W. The application of image processing for monitoring student's attention level during online class / J. W. Ong, W. J. Chew, S. K. Phang // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2120, No. 1. – P. 012028
5. Puthea, Kh. The Attendance Marking System based on Eigenface Recognition using OpenCV and Python / Kh. Puthea, R. Hartanto, R. Hidayat // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1551, No. 1. – P. 012012.
6. Reading and Writing Images and Video [Электронный ресурс] // OpenCV 2.4.13.7 documentation. – URL: https://docs.opencv.org/2.4/modules/highgui/doc/reading_and_writing_images_and_video.html (дата обращения 14.01.2026).

7. Viola, P. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features / P. Viola, M. Jones // Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. CVPR 2001. – IEEE, 2001. – 8 p.
8. Simonyan, K. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition [Электронный ресурс] / K. Simonyan, A. Zisserman // arXiv. – 2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (дата обращения 15.02.2026).
9. Abdlkader, F. D. Design and analysis of face recognition system based on VGGFace-16 with various classifiers / F. D. Abdlkader, M. F. Ghanim // IAES International Journal of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 13, No. 2. – P. 1499.
10. Суханов, А. А. Исследование качества распознавания студентов по изображению лиц в системе видеоконтроля / А. А. Суханов, О. И. Федяев // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 23–25 октября 2024 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 210-214.
11. Face Recognition Dataset - Oneshot Learning [Электронный ресурс] // Kaggle. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/stoicstatic/face-recognition-dataset/data> (дата обращения 15.02.2026).
12. Khawaja Muhammad Fahd. Comparison of Evaluation Metrics used in Machine Learning Models [Электронный ресурс] // Educative. – URL: <https://www.educative.io/blog/evaluation-metrics-ml-models> (дата обращения 16.02.2026).

Поступила в редакцию 19.02.2026 г., рекомендована к изданию 16.03.2026 г.

RESEARCH ON THE QUALITY OF NEURAL NETWORK RECOGNITION OF STUDENTS ENTERING THE CLASSROOM BY SIMULATING A VIDEO STREAM OF FACIAL IMAGES FROM A DATABASE

Fediaev O.I., Sukhanov A.A.

The problem of video-based recording of student presence at a training session is considered. The formulation of the face recognition task and the functional diagram of the system are presented. Student face recognition is planned in real-time using the VGGFace16 convolutional neural network model. In this work, the dynamics of the recognition process were modeled through special experiments using color photographs of 1,680 individuals. During the simulation, the light flux containing face images, fed to the video camera of the recognition system, was generated by a separate computer, which set various scenarios for the computational experiments. A study was conducted on the influence of the dataset size and the dynamics of face presentation in the video stream on recognition accuracy. The performance of the recognition algorithms was evaluated using various quality metrics. This video monitoring system can be recommended for use by educators in educational institutions.

Keywords: computer vision, video recording of students, video stream, convolutional neural network, VGGFace16 model, face recognition, quality metrics.

Федяев Олег Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии им. Л.П. Фельдмана ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: olegfedyayev@mail.ru

Fediaev Oleg Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Software Engineering named after the L.P. Feldman of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6822-7306>.

Суханов Антон Алексеевич

аспирант кафедры программной инженерии им. Л.П. Фельдмана, младший научный сотрудник молодежной лаборатории искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: studysukhanov@mail.ru

Sukhanov Anton Alekseevich

Postgraduate student at Department of Software Engineering named after the L.P. Feldman, Junior Researcher at the Youth Laboratory of Artificial Intelligence of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНЫХ И ЦИКЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ В ИИС АСУ И АСНИ

© 2026 *Третьяков И.А., Данилов В.В., Подлесный В.Ю., Колесник Е.В.*

В настоящей работе продолжены исследования основ информационно-измерительных технологий в информационно-измерительных системах автоматизированных систем управления и автоматизированных системах научных исследований, в частности рассмотрены показатели эффективности адаптивных и циклических систем сбора данных, а также методика их сравнения.

Ключевые слова: АСУ, АСНИ, ИИС, измерительные сообщения, буферное запоминающее устройство, адаптивная коммутация, вероятность потерь, показатели эффективности.

Введение. В условиях стремительного развития информационных технологий и постоянного расширения сферы применения автоматизированных систем управления (АСУ) и автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) особую актуальность приобретает задача эффективной обработки больших объемов измерительной информации [1-4].

Современная практика автоматизации процессов управления и научных исследований немыслима без информационно-измерительных систем (ИИС), выступающих в качестве сенсорного слоя сложных технологических комплексов, современные АСУ и АСНИ генерируют значительные потоки измерительных сообщений - данных, поступающих от датчиков и измерительных устройств в реальном времени [5-9]. Именно на базе ИИС формируется первичная картина состояния исследуемого объекта. Ключевым аспектом здесь становится выбор стратегии сбора данных. Традиционные циклические схемы, отличающиеся предсказуемостью и простотой реализации, зачастую оказываются избыточными при стабильной работе объекта либо, напротив, недостаточно оперативными при возникновении нештатных ситуаций. В то же время адаптивные подходы, динамически подстраивающие частоту, объем и состав измерений под текущее состояние системы, способны существенно повысить информативность наблюдений, но привносят дополнительную сложность в архитектуру ИИС, алгоритмы обработки и требования к вычислительным ресурсам.

В работах [10, 11] рассматривались информационные модели измерительных сообщений, модели стационарных и нестационарных случайных измерительных процессов, погрешности при измерениях и передаче, а также исследования дискретной формы непрерывных процессов, оптимальное дискретное представление, дискретизация полиномами Лежандра. В [12, 13] рассматривалось восстановление непрерывных сообщений интерполяционными алгебраическими полиномами и интерполяция по показателю среднего квадратического приближения, выявлен оптимальный способ интерполирования, определены погрешности дискретного представления по показателю равномерного приближения и погрешности экстраполяции.

В настоящей работе продолжены исследования основ информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ, в частности рассмотрены показатели эффективности адаптивных и циклических систем сбора данных в ИИС, а также методика их сравнения.

Показатели эффективности адаптивных и циклических систем сбора данных в ИИС. В качестве показателей эффективности, будем использовать объем сообщения I_T и суммарную приведенную среднюю квадратическую погрешность восстановления δ_Σ в расчете на измерительный канал [13].

Объем сообщения на канал в адаптивной системе сбора в общем случае будет определяться выражением:

$$I_{T,ad} = v_c (\kappa_\Sigma + \kappa_{adp} \Sigma +) = v_c \kappa_\Sigma + v_c \kappa_{adp} \Sigma + v_c \kappa_{вр} \Sigma = I_c + I_{adp} + I_{вр}, \quad (1)$$

где I_c , v_c - объем и приведенное число существенных координат на эквивалентном интервале T_3 ; $I_{adp} = v_c \kappa_{adp} \Sigma$; $I_{вр} = v_c \kappa_{вр} \Sigma$ - объемы сообщений адресации и датирования координат на эквивалентном интервале T_3 ; $\kappa_{adp} \Sigma, v_c \kappa_{вр} \Sigma$ - суммарное число двоичных разрядов соответственно адресации и датирования, содержащихся в $(N_\kappa + 1)$ координатах процесса $\lambda(t)$ на интервале представления [13]. При представлении выборками $\kappa_\Sigma = \kappa$; $\kappa_{adp} \Sigma = \kappa_{adp}$; $\kappa_{вр} \Sigma = \kappa_{вр}$, где κ , κ_{adp} , $\kappa_{вр}$ - числа разрядов в соответствующих частях слова одной выборки.

При адаптивной коммутации $I_{вр} = 0$. Если средний коэффициент сжатия на канал без учета служебной информации составляет:

$$k_{сж} = I_0 / I = v \kappa_\Sigma / v_c \kappa_\Sigma = v / v_c,$$

где $v_c = \bar{F}_0 T_3 = \bar{F}_0 / (2F_{c \max})$, то уменьшение объема сообщения в адаптивной системе сбора по сравнению с циклической на основании (1) и [13] составит:

$$k_{ad} = I_0 / (I_{T,ad}) = I_0 / (I_c + I_{adp} + I_{вр}) = k_{сж} / (1 + \Theta_{adp} + \Theta_{вр}), \quad (2)$$

где $\Theta_{adp} = I_{adp} / I_c = \kappa_{adp} \Sigma / \kappa_\Sigma$ и $\Theta_{вр} = I_{вр} / I_c = \kappa_{вр} \Sigma / \kappa_\Sigma$ - соответственно доли адресной и временной части сообщения по отношению к основной (содержащей значения существенных выборок).

Как видно из (2), некоторые дополнительные возможности уменьшения объема сообщения в адаптивной системе (при фиксированном $k_{сж}$) в уменьшении объемов (сжатия) адресной и временной части сообщения.

Одним из известных методов сжатия адресной части сообщения является позиционный способ представления, при котором всей последовательности номеров каналов содержащейся в полном цикле коммутации, ставится в соответствие общее адресное слово [14]. Независимо от наличия/отсутствия в результате сжатия выборки какого-либо канала это слово всегда содержит одинаковое число двоичных символов, равное числу выборок в полном цикле, причем позиции выборки в цикле соответствует позиция символа в адресном слове. Каждый символ принимает два значения: нуль – если соответствующая выборка в цикле устранена как избыточная; единица – если соответствующая выборка существенная и передается.

При позиционном способе объем адресной части сообщения составит $I_{adp} = v$, поскольку $\kappa_{adp} \Sigma = 1$, а число символов определяется числом выборок в полном цикле, независимо от того сколько в них существенных. Тогда для позиционного способа имеем:

$$\Theta_{aдр,n} = I_{aдр,n} / I_c = v / (k_{сжс} / \kappa_{\Sigma}) = k_{сжс} / \kappa_{\Sigma}.$$

Сокращение объема адресной части по сравнению с передачей полного адреса с каждой существенной выборкой будет определяться отношением:

$$\Theta_{aдр} / \Theta_{aдр,n} = (\kappa_{aдр\Sigma} / \kappa_{\Sigma}) / (k_{сжс} / \kappa_{\Sigma}) = \kappa_{aдр\Sigma} / k_{сжс}.$$

Отсюда видно, что сокращение объема адресной части сообщения при позиционном способе по сравнению с передачей адреса для каждой существенной выборки будет иметь место лишь при не очень больших коэффициентах сжатия данных или при большом числе измерительных каналов ($N \gg 1$):

$$k_{сжс} < \kappa_{aдр\Sigma} = \log_2 N.$$

Оценим объем сообщений датирования и возможности его сокращения. Погрешность Δt датирования очередной выборки эквивалентна погрешности $\Delta\lambda = \lambda(t + \Delta t) - \lambda(t)$ в значении выборки при точном датировании; следовательно, средний квадрат погрешности датирования δ_D^2 будет равен дисперсии конечной разности первого порядка [11]: $\delta_D^2 = \delta_{\Delta\lambda}^2$, вычисленной при подстановке вместо v приведенной частоты датирования (частоты меток времени) $\nu_D = F_D / 2F_{c\max}$, где $F_D = 1 / \Delta t$.

Например, для не дифференцируемого процесса с корреляционной функцией экспоненциального типа на основании [11], получим:

$$\delta_D^2 = 2\pi / \nu_D. \quad (3)$$

Для более гладких процессов погрешность датирования δ_D^2 при той же величине Δt будет меньше [11].

Число разрядов в слове времени (при представлении сообщения выборками):

$$\kappa_{вр\Sigma} = \kappa_{вр} = \log_2(T_{вр} / \Delta t), \quad (4)$$

где $T_{вр}$ - шкала времени (полный цикл датчика времени, после которого счет возобновляется с нуля).

Если потребовать, чтобы погрешность датирования была пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью представления:

$$\delta_D^2 \ll \delta_{вр}^2, \quad (5)$$

то, например, для ступенчатой интерполяции не дифференцируемого процесса согласно (3) это приведет к соотношению $2\pi / \nu_D \ll \delta_{вр}^2$, откуда:

$$\nu_D \gg \nu; \Delta t \ll T_0. \quad (6)$$

Для других, более гладких процессов и других степеней интерполирующих полиномов требование (5) также приведет к неравенствам (6).

Таким образом, при выполнении условий (6) погрешностью датирования можно пренебречь, однако число разрядов в слове времени, определяемое согласно (4), может быть сравнимо с числом разрядов в кодовом слове выборки.

Пусть, например, $\Delta t = 0,1T_0 = 0,1T_s / \nu$. Для бесконечного дифференцируемого процесса с корреляционной функцией [10] при использовании линейной интерполяции на основании [11] и условия $\delta_{np}^2 = (1/3)\delta_\Sigma^2$ найдем $\nu = [\pi^4 / (200\delta_\Sigma^2)]$. Тогда $\Delta t = 0,1T_s \cdot (200\delta_\Sigma^2)^{1/4} / \pi$, и согласно (4) имеем оценку:

$$\kappa_{ep} = \log_2 \left(\frac{T_{np}}{T_s} \cdot \frac{10\pi}{(200\delta_\Sigma^2)^{1/4}} \right). \quad (7)$$

Соответствующая данному случаю оценка для числа разрядов в кодовом слове выборки будет [13]:

$$\kappa = (1/2) \log_2 (6 / \delta_\Sigma^2). \quad (8)$$

Например, при $T_{np} = T_s$; $\delta_\Sigma = 10^{-1}$ из (7) и (8) имеем $\kappa_{ep} \approx \kappa \approx 4 \div 5$; следовательно, $\theta_{ep} \approx 1$.

Объем информации датирования можно существенно уменьшить, если передавать приращение времени между соседними существенными выборками или, еще лучше, пропорциональное ему с коэффициентом T_0 число избыточных выборок $N_{изб}$, исключенных устройством сжатия между соседними существенными. При этом число разрядов в слове времени будет определяться максимальным значением величины $N_{изб \max}$:

$$\kappa_{ep}^I = \log_2 N_{изб \max}, \quad (9)$$

а величину $N_{изб \max}$ можно оценить через моменты распределения; величины текущего коэффициента сжатия:

$$N_{изб \max} \approx k_{изб \max} \approx k_{сжс} + \eta_p \sigma_{k_{сжс}}, \quad (10)$$

где $k_{сжс}$ и $\sigma_{k_{сжс}}$ - среднее значение и среднее квадратическое отклонение коэффициента сжатия; η_p - коэффициент пропорциональности, зависящий от вида закона распределения коэффициента сжатия и доверительной вероятности P .

При передаче числа пропущенных избыточных выборок доля информации датирования с учетом (9) и (10) составит:

$$\Theta_{epизб} = \log_2 k_{сжс \max} / \kappa_\Sigma,$$

а сокращение объема информации датирования по сравнению с передачей полных слов времени будет определяться отношением:

$$\Theta_{ep} / \Theta_{epизб} = (\kappa_{ep} / \kappa_\Sigma) / [(\log_2 k_{сжс \max}) / \kappa_\Sigma] = \kappa_{ep} / (\log_2 k_{сжс \max}),$$

и, следовательно, будет иметь место при условии:

$$\log_2 k_{сжс \max} < \kappa_{ep}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что сокращение объема сообщений датирования при передаче числа пропущенных избыточных выборок по сравнению с передачей полных слов времени (с числом разрядов κ_{ep}) будет иметь место при не очень больших коэффициентах сжатия или при высокой точности датирования ($\kappa_{ep} \gg 1$). Если условие (11) не выполняется, то более целесообразно передавать с каждой выборкой полный код времени.

Таким образом, применяя те или иные методы сокращения объема время - адресной части сообщения, выбранные с учетом характеристик конкретной ИИС (числа каналов, точности датирования, средней и максимальной величин коэффициента сжатия), можно в принципе добиться, чтобы доля этой части сообщения была невелика: $\Theta_{adr} \ll 1$, $\Theta_{ep} \ll 1$. При этом результирующее уменьшение объема сообщения в адаптивной системе по сравнению с циклической можно оценить согласно (2) величиной:

$$\kappa_{ad} = I_0 / I_{T,ad} \gg k_{сж} / 3, \quad k_{ad} \ll k_{сж}.$$

При $\Theta_{adr} = 1$; $\Theta_{ep} = 1$ (худший случай) уменьшение объема сообщения в адаптивной системе составит:

$$k_{ad} = k_{сж} / 3. \quad (12)$$

Это означает, что результирующее уменьшение объема сообщения в адаптивной системе по сравнению с циклической может быть достигнуто только в результате применения тех алгоритмов адаптивного представления (сжатия данных), которые обеспечат средний коэффициент сжатия (без учета служебной информации) $k_{сж} > 3$.

При меньшем коэффициенте сжатия необходимость передачи время - адресной информации может свести к нулю весь эффект сжатия. Для завершения сравнения адаптивной и циклической систем сбора данных необходимо еще оценить изменение величины суммарной дисперсии погрешности, которая определяется согласно выражению:

$$\delta_{\Sigma}^2 = \delta_{np}^2 + \delta_{кв \Sigma}^2 + \delta_{op \Sigma}^2,$$

и для циклической системы оценка была предложена в [13].

В адаптивной системе сбора имеется дополнительный источник погрешности - потери некоторого числа существенных выборок при группировании потоков, которые характеризуются величиной вероятности потерь $P_{пот}$. При отсутствии потерь погрешности адаптивного и регулярного представления равны. Сжатие данных не увеличивает погрешность (если не касаться чисто аппаратной погрешности), а искажение различных частей сообщения (в том числе время-адресной части) помехами в канале связи пока не рассматривается и включается в величину δ_{op}^2 .

Потери существенных выборок ведут к возрастанию величины одной из составляющих суммарной погрешности - погрешности представления δ_{np} - за счет увеличения интервала между оставшимися выборками, по которому осуществляется восстановление исходного непрерывного сообщения на приемной стороне. Возрастание величины δ_{np} за счет указанных потерь можно оценить по следующей приближенной методике.

Методика сравнения эффективности адаптивной и циклической систем сбора данных в ИИС. Пусть в отсутствие потерь существенных выборок (при группировании потоков) дисперсия погрешности представления в некотором состоянии S_j нестационарного процесса $\delta_{np j}^2 = \delta_{np 0j}^2(T_{0j})$ (при заданном методе интерполяции и заданной модели сообщения).

Потери выборок приведут к случайному, но кратному периоду T_{0j} интервалу следования iT_{0j} между соседними выборками, где $i=1+l$ - число периодов T_{0j} между существенными выборками, по которым выполняется интерполяция; l - число подряд потерянных существенных выборок ($l=0,1,2,\dots$).

При этом средняя дисперсия погрешности представления оценивается в виде:

$$\delta_{np\ j}^2 = \sum_{i=1}^{\infty} \delta_{np\ 0j}^2 (iT_{0j}) P(iT_{0j}), \quad (13)$$

где $P(iT_{0j})$ - распределение вероятностей длины интервала между соседними выборками, по которым осуществляется интерполяция.

Распределение вероятностей длин интервала между выборками может определяться [14]:

$$P(iT_{0j}) = iP_{nom}^{i-1} (1 - P_{nom})^2, \quad (14)$$

где P_{nom} - вероятность потери существенной выборки.

При выводе зависимости (14) предполагалось, что распределение $P(l)$ подряд потерянных l существенных выборок является геометрическим (распределением Фарри):

$$P(l) = P_{nom}^l (1 - P_{nom}).$$

Подставляя (14) в (13), получим выражение:

$$\delta_{np\ j}^2 = \sum_{i=1}^{\infty} \delta_{np\ 0j}^2 (iT_{0j}) iP_{nom}^{i-1} (1 - P_{nom})^2 = \gamma_j \delta_{np\ 0j}^2, \quad (15)$$

где $\gamma_j = \frac{1}{\delta_{np\ 0j}^2 (iT_{0j})} \sum_{i=1}^{\infty} \delta_{np\ 0j}^2 (iT_{0j}) iP_{nom}^{i-1} (1 - P_{nom})^2$ - коэффициент увеличения

погрешности в рассматриваемом состоянии за счет потерь существенных выборок.

Применяя формулу (15) к каждому из возможных состояний S_j ($j=1,2,\dots,n$) нестационарного процесса и учитывая вероятности состояний, найдем средний по всем состояниям квадрат погрешности представления:

$$\overline{\delta_{np}^2} = \sum_{j=1}^n \delta_{np\ i}^2 P_j = \sum_{j=1}^n \gamma_j \delta_{np\ 0j}^2 (T_{0j}) P_j = \delta_{np\ 0}^2 \sum_{j=1}^n \gamma_j P_j,$$

поскольку частота опроса T_{0j} в каждом j -м состоянии соответствует одинаковой заданной погрешности δ_{np}^2 : $\delta_{np\ 01}^2(T_{01}) = \delta_{np\ 02}^2(T_{02}) = \dots = \delta_{np\ 0n}^2(T_{0n}) = \delta_{np\ 0}^2$.

Таким образом, коэффициент увеличения погрешности представления на всем интервале наблюдения нестационарного процесса за счет потери существенных выборок по сравнению с погрешностью без потерь определяется выражением:

$$\gamma_{\Sigma} = \overline{\delta_{np}^2} / \delta_{np\ 0}^2 = \sum_{j=1}^n \gamma_j P_j. \quad (16)$$

Для расчета $\delta_{np\ 0}^2(T_0)$, рекомендуется использовать следующие выражения:

- в случае модели локально-стационарного процесса выражение погрешности представления для наиболее динамичного (т. е. требующего наибольшей частоты опроса) состояния;

- в случае переходного нестационарного процесса выражение погрешности представления, полученное на том интервале, где она максимальна (т. е. также на участке наибольшей динамичности процесса).

Сравним эффективности адаптивной и циклической систем сбора данных в расчете на измерительный канал при следующих условиях:

- модель нестационарного измерительного сообщения и метод адаптивного представления соответствуют для случая $\Omega_{c1} \gg \Omega_{c2}; \Omega_{c1} \gg \Omega_{c3}$);

- группирование потоков осуществляется системой с буферным запоминающим устройством (БЗУ);

- вместе с каждой существенной выборкой передаются слово адреса и слово времени, так что итоговое сокращение объема сообщения определяется выражением (12).

Пользуясь предложенной методикой, рассчитаем для каждой из сравниваемых систем объем сообщения и суммарную погрешность. Для циклической системы обе характеристики должны рассчитываться по наиболее динамичному (т. е. требующему наибольшей частоты опроса) состоянию, в данном случае – по $S_1(k=1, \Omega_c = \Omega_{c1})$. Из данных в [13] находим:

$$\delta_{\Sigma}^2 = \pi / (3\nu) + (2/3) \cdot [3 / (\alpha^{2\kappa}) + \delta_{op}^2] = \Omega_{c1} / (3F_{01}) + 2/3 \cdot [3 / (\alpha^{2\kappa}) + \delta_{op}^2].$$

Для адаптивной системы с учетом (12) получим:

$$I_{T,ad} = I_0 / k_{ad} = 3\nu\kappa / k_{сжс}.$$

Остается учесть возрастание погрешности δ_{Σ} за счет потерь существенных выборок в БЗУ. В соответствии с [11], для рассматриваемых состояний имеем соответственно:

$$\begin{cases} \delta_{np\ 01}^2(T_{01}) = \pi / (3\nu_1) = \Omega_{c1}T_{01} / 3 \\ \delta_{np\ 02}^2(T_{02}) = \sqrt{2}\pi^3 / (45\nu_2^3) = (\sqrt{2} / 45) \cdot \Omega_{c2}^3T_{02}^3 \\ \delta_{np\ 03}^2(T_{03}) = \pi^4 / (600\nu_3^4) = \Omega_{c3}^4T_{03}^4 / 600 \end{cases} \quad (17)$$

Основываясь на полученных выражениях, найдем:

$$\gamma_1 = \sum_{i=1}^{\infty} i^2 P_{nom}^{i-1} (1 - P_{nom})^2;$$

$$\gamma_2 = \sum_{i=1}^{\infty} i^4 P_{nom}^{i-1} (1 - P_{nom})^2.$$

Откуда при заданном P_{nom} вычисляем $\gamma_{\Sigma} = 0,02\gamma_1 + 0,49\gamma_2 + 0,49\gamma_3$. Используя (15) и (16) получаем погрешность представления с учетом потерь в БЗУ $\overline{\delta_{np}^2} = \delta_{np0}^2 \gamma_{\Sigma}$, где вычисления δ_{np0}^2 можно использовать любую из оценок (17), но удобнее ту, которая соответствует наиболее динамичному состоянию, в данном случае – первому ($\nu_1 = \nu$), поскольку эта же оценка входит в выражения для циклической системы. Окончательно, для адаптивной системы сбора имеем $\delta_{\Sigma}^2 = \pi\gamma_{\Sigma} / (3\nu) + (2/3) \cdot [3/(\alpha^{2\kappa}) + \delta_{op}^2]$.

Для сравнения обеих систем в соответствии с методикой [13], сделаем допущение $\delta_{np}^2 = \delta_{kv}^2 = \delta_{op}^2 = (1/3) \cdot \delta_{\Sigma}^2$. Получим следующие расчетные выражения:

- для циклической системы сбора данных $\nu = \pi / (\delta_{\Sigma}^2)$; $\kappa = 1 / (2 \ln 2) \cdot \ln(6 / \delta_{\Sigma}^2)$; $I_0 = \nu \kappa$.

- для адаптивной системы сбора данных $\nu = \pi\gamma_{\Sigma} / (\delta_{\Sigma}^2)$; $\nu_c = \nu / k_{сж}$; $\kappa = 1 / (2 \ln 2) \cdot \ln(6 / \delta_{\Sigma}^2)$; $I_{T ад} = 3\nu\kappa / k_{сж}$ (где $k_{сж}$, согласно [13], определяется выражением $k_{сж} = \frac{50}{1 + \frac{\Omega_{c2}}{\Omega_{c1}} 22(\frac{\delta_{\Sigma}}{\sqrt{3}})^{4/3} + \frac{\Omega_{c2}}{\Omega_{c1}} 8(\frac{\delta_{\Sigma}}{\sqrt{3}})^{3/2}}$ ≈ 50 , так как предполагалось, что

$\Omega_{c1} \gg \Omega_{c2}; \Omega_{c1} \gg \Omega_{c3}$; $\delta_{\Sigma} < 10^{-3}$). Результаты расчетов по полученным формулам в виде графиков I_T как функции δ_{Σ} при $\rho=0,9$ и различных значениях емкости БЗУ показаны на рисунке 1.

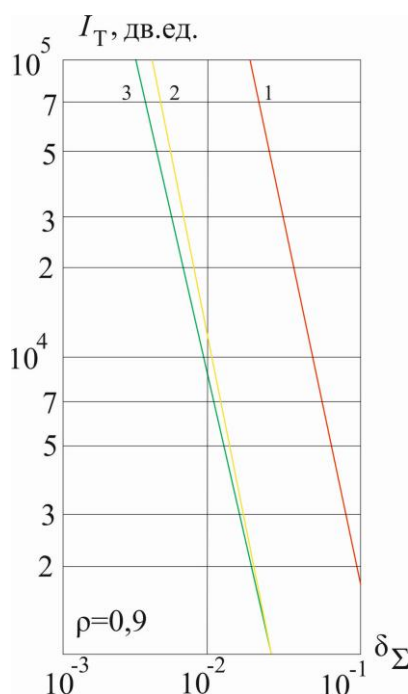


Рис. 1. Сравнение эффективности адаптивной и циклической систем сбора данных:

1 - циклическая система; 2 - адаптивная система с БЗУ емкостью $\mathfrak{Z} = 5$;

3 - адаптивная система с БЗУ емкостью $\mathfrak{Z} = 50$

Выводы. Предложена методика сравнения эффективности адаптивной и циклической систем сбора данных. Показано что, несмотря на потери существенных выборок при группировании потоков и необходимость передачи дополнительной (время-адресной) информации, адаптивная система сбора может обеспечить по сравнению с циклической значительное сокращение объема передаваемых сообщений при той же верности воспроизведения (погрешности δ_{Σ}), причем потери существенных выборок в БЗУ начинают сказываться лишь при малой емкости БЗУ ($\mathfrak{Z} \leq 5$), т. е. при вероятности потерь $P_{\text{пот}} \geq 10^{-2}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тымчук, А. И. Информационная система контроля достоверности данных приборов учёта в автоматизированной информационно-измерительной системе контроля и учёта электроэнергии / А. И. Тымчук // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 6(144). – DOI 10.60797/IRJ.2024.144.79. – EDN GOCKVN.
2. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы измерения параметров турбулентности / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 20-25. – DOI 10.5281/zenodo.15056665. – EDN BEWEYW.
3. Житников, А. А. Разработка прототипа устройства идентификации неисправности информационно-измерительного канала частоты оборотов двигателя внутреннего сгорания / А. А. Житников, А. А. Марченко // Известия КГТУ. – 2026. – № 80. – С. 95-109. – DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-95-109. – EDN DHLHTT.
4. Баширов, М. Г. Применение промышленных информационно-измерительных и управляющих систем для построения цифровых двойников: опыт разработки на примере процесса гидрирования ацетилена / М. Г. Баширов, К. А. Крышко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2026. – № 1. – С. 5-15. – DOI 10.5281/zenodo.19201696. – EDN XGWVDY.
5. Житников, А. А. Разработка алгоритма идентификации неисправности информационно-измерительного канала температуры / А. А. Житников, А. А. Марченко, С. В. Чебанюк // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2026. – Т. 75, № 1. – С. 242-252. – DOI 10.48612/dalrybvtuz/2026-75-24. – EDN OUXADX.
6. Скодтаев, Э. В. Аппаратная архитектура информационно-управляющей системы мобильной установки первичной пастеризации молока / Э. В. Скодтаев // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 2(37). – С. 148-158. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-148-158. – EDN SPHFZD.
7. Личман, А. А. Алгоритм интеллектуализации предупреждения сбоев АСУ на основе предиктивной аналитики / А. А. Личман, О. Ю. Чередникова // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 3(38). – С. 148-156. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-148-156. – EDN UNNEQC.
8. Информационно-управляющая система контроля технологического процесса изготовления комплексных минеральных удобрений / Н. В. Водолазская, М. К. Вотинцев, Е. В. Копытова, А. И. Хищенко // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 4(39). – С. 125-136. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-125-136. – EDN STZWPM.
9. Информационно-измерительная система обнаружения, прогнозирования и оценки загрязнения поверхностных вод / В. М. Панарин, А. А. Маслова, Е. М. Рылеева, В. А. Браун // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 4. – С. 5-18. – DOI 10.5281/zenodo.18229624. – EDN PWBTTT.
10. Основы информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Е. В. Колесник // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 64-74. – DOI 10.5281/zenodo.14018604. – EDN SDSQAP.
11. Оптимальное дискретное представление непрерывных измерительных процессов в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, В. В. Данилов, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 52-62. – DOI 10.5281/zenodo.14514529. – EDN VEQGYZ.
12. Процедура восстановления непрерывных сообщений в измерительных процессах в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, И. А. Третьяков, В. В. Данилов [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 112-120. – DOI 10.5281/zenodo.15056709. – EDN MFJTTH.

13. Оптимальная интерполяция непрерывных измерительных процессов в АСУ и АСНУ / В. Ю. Подлесный, Е. В. Колесник, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 2(37). – С. 129-147. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-129-147. – EDN MUIODM.
14. Новоселов, О. Н. Оценка обнаруживающей способности разностных методов отбраковки недостоверных данных / О. Н. Новоселов // Известия Вузов. Серия Приборостроение. – 1978. – №1. – С. 117-121.

REFERENCES LIST

1. Tymchuk, A. I. Informatsionnaia sistema kontrolia dostovernosti dannykh priborov ucheta v avtomatizirovannoi informatsionno-izmeritelnoi sisteme kontrolia i ucheta elektroenergii / A. I. Tymchuk // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. – 2024. – № 6(144). – DOI 10.60797/IRJ.2024.144.79. – EDN GOCKVN.
2. Pometun, E. D. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy izmereniia parametrov turbulentnosti / E. D. Pometun, V. N. Lebedev // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 1. – С. 20-25. – DOI 10.5281/zenodo.15056665. – EDN BEWEYW.
3. Zhitnikov, A. A. Razrabotka prototipa ustroistva identifikatsii neispravnosti informatsionno-izmeritelnogo kanala chastoty oborotov dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia / A. A. Zhitnikov, A. A. Marchenko // Izvestiia KGTU. – 2026. – № 80. – С. 95-109. – DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-95-109. – EDN DHLHTT.
4. Bashirov, M. G. Primenenie promyshlennykh informatsionno-izmeritelnykh i upravliaiushchikh sistem dlia postroeniia tsifrovyykh dvoynikov: opyt razrabotki na primere protsessa gidrirovaniia atsetilena / M. G. Bashirov, K. A. Kryshko // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2026. – № 1. – С. 5-15. – DOI 10.5281/zenodo.19201696. – EDN XGWVDY.
5. Zhitnikov, A. A. Razrabotka algoritma identifikatsii neispravnosti informatsionno-izmeritelnogo kanala temperatury / A. A. Zhitnikov, A. A. Marchenko, S. V. Chebaniuk // Nauchnye trudy Dalrybvtuza. – 2026. – Т. 75, № 1. – С. 242-252. – DOI 10.48612/dalrybvtuz/2026-75-24. – EDN OUXADX.
6. Skodtaev, E. V. Apparatnaia arkhitektura informatsionno-upravliaiushchei sistemy mobilnoi ustanovki pervichnoi pasterizatsii moloka / E. V. Skodtaev // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2025. – № 2(37). – С. 148-158. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-148-158. – EDN SPHFZD.
7. Lichman, A. A. Algoritim intellektualizatsii preduprezhdeniia sboev ASU na osnove prediktivnoi analitiki / A. A. Lichman, O. Iu. Cherednikova // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2025. – № 3(38). – С. 148-156. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-3-38-148-156. – EDN UHNEQC.
8. Informatsionno-upravliaiushchaia sistema kontrolia tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniia kompleksnykh mineralnykh udobrenii / N. V. Vodolazskaia, M. K. Votintsev, E. V. Kopytova, A. I. Khitsenko // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2025. – № 4(39). – С. 125-136. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-125-136. – EDN STZWPM.
9. Informatsionno-izmeritelnaia sistema obnaruzheniia, prognozirovaniia i otsenki zagriazneniia poverkhnostnykh vod / V. M. Panarin, A. A. Maslova, E. M. Ryleeva, V. A. Braun // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 4. – С. 5-18. – DOI 10.5281/zenodo.18229624. – EDN PWBTTT.
10. Osnovy informatsionno-izmeritelnykh tekhnologii v ASU i ASNI / V. Iu. Podlesnyi, V. V. Danilov, I. A. Tretiakov, E. V. Kolesnik // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 3. – С. 64-74. – DOI 10.5281/zenodo.14018604. – EDN SDSQAP.
11. Optimalnoe diskretnoe predstavlenie nepreryvnykh izmeritelnykh protsessov v ASU i ASNI / V. Iu. Podlesnyi, V. V. Danilov, I. A. Tretiakov [i dr.] // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 4. – С. 52-62. – DOI 10.5281/zenodo.14514529. – EDN VEQGYZ.
12. Protseduira vosstanovleniia nepreryvnykh soobshchenii v izmeritelnykh protsessakh v ASU i ASNI / V. Iu. Podlesnyi, I. A. Tretiakov, V. V. Danilov [i dr.] // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 1. – С. 112-120. – DOI 10.5281/zenodo.15056709. – EDN MFJTTH.
13. Optimalnaia interpoliatsiia nepreryvnykh izmeritelnykh protsessov v ASU i ASNI / V. Iu. Podlesnyi, E. V. Kolesnik, I. A. Tretiakov, V. V. Danilov // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2025. – № 2(37). – С. 129-147. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-129-147. – EDN MUIODM.
14. Novoselov, O. N. Otsenka obnaruzhivaiushchei sposobnosti raznostnykh metodov otbrakovki nedostovernnykh dannykh / O. N. Novoselov // Izvestiia Vuzov. Seriya Priborostroenie. – 1978. – №1. – С. 117-121.

Поступила в редакцию 10.03.2026 г., рекомендована к изданию 02.04.2026 г.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ADAPTIVE AND CYCLIC DATA COLLECTION SYSTEMS IN IMS ACS AND ASRS

Tretiakov I.A., Danilov V.V., Podlesnyi V.IU., Kolesnik E.V.

In this paper, we continue to study the fundamentals of information and measurement technologies in information and measurement systems of automated control systems and automated research systems, in particular, we consider the performance indicators of adaptive and cyclic data collection systems, as well as the methodology for comparing them.

Keywords: ACS, ASRS, IMS, measurement messages, buffer storage device, adaptive switching, probability of losses, efficiency indicators.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7816-1563>

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8974-7268>

Подлесный Владимир Юрьевич

аспирант кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: pikaayzek@yandex.ru

Podlesnyi Vladimir IUrevich

Postgraduate Student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Колесник Екатерина Витальевна

аспирант кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ketrinkilli@ya.ru

Kolesnik Ekaterina Vitalevna

Postgraduate Student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЛОЖНОСТИ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ JS-ДИВЕРГЕНЦИИ И СТРУКТУРНОГО РАССТОЯНИЯ

© 2026 Звягинцева А.В., Бражников А.Р.

Проведен систематический анализ трёх подходов к оценке сложности систем: энтропии Шеннона, алгоритмической сложности Колмогорова и метода ранних предупреждающих сигналов. Показано, что существующие методы обладают ограниченной универсальностью для нестационарных многомерных систем. Центральным вкладом работы является феноменологический подход, оценивающий сложность как отклонение текущего состояния системы от опорного (нормального) режима. Предложен интегральный показатель информационной сложности, основанный на адаптивной комбинации симметризованной дивергенции Йенсена-Шеннона и нормированного структурного расстояния Фробениуса. Введена автоматическая процедура определения весового коэффициента. Выдвинута гипотеза о кросс-доменной инвариантности двухфазного механизма деградации. Сформирована эмпирическая база из пяти предметных областей для верификации метода. На курсах валют ЦБ РФ за 2018–2026 гг. (окно 252 торговых дня) проведен расчётный эксперимент: интегральный показатель информационной сложности идентифицировал санкционный шок 2022 года как наиболее острый эпизод и подтвердил гипотезу о доменно-специфичной декомпозиции (тест Краскела-Уоллиса).

Ключевые слова: сложность, энтропия, информационная мера, критические переходы, дивергенция Йенсена-Шеннона, многомерный анализ, феноменологическая модель.

Введение. На практике многомерные системы различной природы (финансовые рынки, климатические процессы, спутниковый мониторинг) демонстрируют схожие особенности при приближении к критическим переходам: рост неопределённости, качественные изменения в распределениях и появление нестандартных структур связей между переменными [1–3].

Существующие подходы лишь частично отражают динамику сложных систем: энтропийные меры [4] фиксируют неопределённость, но не учитывают структуру связей; алгоритмическая сложность [5, 6] концептуально универсальна, но практически невычислима; методы ранних предупреждающих сигналов (EWS) [1–3] зависят от специфики предметной области. Понятие сложности трактуется в зависимости от контекста: в информационной теории – через объём информации [4, 5], в системном анализе – через структуру взаимосвязей [7], в прикладных областях – через специфические метрики [7–10].

Систематическое сравнение 13 многомерных индикаторов устойчивости, проведенное Вейнанс и соавторами [7], показало, что универсального метода не существует: выбор оптимального индикатора определяется характеристиками конкретной системы и доступными данными.

Настоящая работа решает следующие задачи:

- 1) систематический анализ ограничений трёх классических подходов к оценке сложности систем;
- 2) разработка феноменологического интегрального показателя на основе адаптивной комбинации дивергенции Йенсена-Шеннона и структурного расстояния Фробениуса;
- 3) формулировка верифицируемых гипотез о кросс-доменной инвариантности механизма деградации;

4) формирование эмпирической базы для экспериментальной проверки предложенного подхода.

Решение перечисленных задач позволяет сформировать унифицированный инструментарий для количественной оценки сложности систем, пригодный к применению в многомерных нестационарных условиях. Это создаёт основу для верификации универсальных закономерностей деградации на данных различной физической природы.

Метод вычисления информационной энтропии Шеннона. Информационная энтропия была предложена К. Шенноном в 1948 г. [4] и отражает средний объём информации, необходимый для описания исхода случайной величины. Для X с вероятностями $p_1, \dots, p_n$ энтропия вычисляется как:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

где $H(X)$ – информационная энтропия случайной величины X , бит; p_i – вероятность i -го исхода, $0 \leq p_i \leq 1$, $\sum_i p_i = 1$; n – число возможных исходов случайной величины X .

Энтропия $H(X)$ показывает, сколько бит требуется в среднем для кодирования одного наблюдения; максимум $\log_2 n$ достигается при равновероятных событиях, нуль – при достоверном исходе.

Применение энтропии Шеннона к нестационарным многомерным системам сопряжено с рядом ограничений: эмпирическая оценка по конечной выборке систематически занижает истинное значение [4]; формула (1) предполагает стационарность, тогда как реальные распределения дрейфуют во времени, а выбор ширины скользящего окна не имеет универсального обоснования; энтропия скалярна и не отражает структуру связей – две системы с одинаковой энтропией могут различаться качественно (по структуре межкомпонентных связей – от полностью независимых до сильно скоррелированных); наконец, это статическая характеристика, не описывающая динамику нарастания беспорядка. Модификации (SampEn [11], перестановочная [12], мультимасштабная [13] энтропия) остаются одномерными и не учитывают межкомпонентных зависимостей.

Энтропия Шеннона хорошо применима для абстрактных информационных каналов [4], однако для анализа многомерных нестационарных систем различной природы её применение существенно ограничено: она растёт перед кризисом, но не указывает ни момент наступления, ни остроту (масштаб и глубину кризисного события).

Метод оценки алгоритмической сложности Колмогорова. А. Н. Колмогоров [5] предложил иной подход: сложность объекта определяется как длина кратчайшей программы, его порождающей. Для универсальной вычислительной машины относительная сложность объекта u при заданном x записывается как:

$$K(u|x) = \min \{l(p) : \Phi(p, x) = u\},$$

где $K(u|x)$ – колмогоровская сложность объекта u относительно объекта x , бит; $\Phi(p, x)$ – функция, применяющая программу p к входным данным x и порождающая u ; $l(p)$ – длина (в битах) программы p ; $\min\{\}$ – минимум берётся по всем программам p , порождающим u при входе x .

Простой объект (например, строка нулей) имеет короткую программу; случайная строка несжимаема – её программа примерно равна длине самой строки. Теорема

инвариантности утверждает: разность сложностей в различных асимптотически оптимальных системах программирования ограничена константой [5]. Алгоритмическая взаимная информация определяется как [5]:

$$I(x:y) = K(y) - K(x), \quad (2)$$

где $I(x:y)$ – количество информации об y , содержащееся в x (алгоритмическая взаимная информация); $K(y)$ – безусловная колмогоровская сложность объекта y ; $K(y|x)$ – колмогоровская сложность y при известном x . Тожество (2) выполняется с точностью до аддитивной константы.

Применение подхода ограничено теоремой Чайтина (1974) [6]: колмогоровская сложность невычислима. На практике используются приближённые оценки на основе сжатия данных [14]: $K(x) \approx |C(x)|$; нормализованное компрессионное расстояние (NCD) определяется как [14]:

$$NCD(x,y) = \frac{\max(|C(y)|) - |C(xy)|}{\max(|C(y)|)},$$

где $NCD(x,y)$ – нормализованное компрессионное расстояние между объектами x и y , $NCD \in [0;1]$; $|C(x)|$, $|C(y)|$, $|C(xy)|$ – размеры (в байтах), сжатых компрессором C объектов x , y и их конкатенации; $\max(,)$ – максимум из двух значений.

Другой подход – приближённая энтропия ($ApEn$), предложенная Pincus [15]:

$$ApEn(m,r,x) = \varphi(m) - \varphi(m+1),$$

где m – длина шаблонного окна; r – порог допустимого отклонения; $\varphi(m)$ – усреднённый натуральный логарифм числа m -подпоследовательностей, совпадающих с шаблоном с точностью r ; $\varphi(m+1)$ – то же для окна длиной $m+1$.

Результат зависит от параметров $m+1$ и r , при этом отсутствует теоретически обоснованный способ определения оптимальных значений [15]. Более устойчивой модификацией является энтропия выборки ($SampEn$), устраняющая смещение $ApEn$ за счёт исключения самосравнений [11], однако проблема выбора параметров сохраняется.

Подход Колмогорова математически фундаментален, однако практически ограничен невычислимостью и зависимостью приближённых оценок от технических деталей реализации; динамику изменения сложности во времени он не отражает.

Метод ранних предупреждающих сигналов (EWS, Early Warning Signals). В работе Scheffer и соавторов [1] показано, что перед фазовым переходом многие системы демонстрируют статистические аномалии из-за механизма критического замедления (critical slowing down): нарастают дисперсия флуктуаций, автокорреляция, асимметрия и эксцесс [1]. Автокорреляция первого порядка:

$$\rho(k) = \frac{Cov(x_t, x_{t+k})}{Var(x)},$$

где $\rho(k)$ – автокорреляционная функция при лаге k ; x_t – значение стационарного временного ряда в момент t ; x_{t+k} – значение ряда в момент $t+k$; $Cov(x_t, x_{t+k})$ – ковариация пары (x_t, x_{t+k}) ; $Var(x)$ – дисперсия ряда (постоянна для стационарного процесса).

Асимметрия и эксцесс определяются соотношениями:

$$Skewness = \frac{E[(x - \mu)^3]}{\sigma^3},$$

где *Skewness* – коэффициент асимметрии распределения; x – случайная величина (наблюдаемая переменная); $\mu = E[x]$ – математическое ожидание; σ – стандартное отклонение; $E[\cdot]$ – оператор математического ожидания.

$$Kurtosis = \frac{E[(x - \mu)^4]}{\sigma^4},$$

где *Kurtosis* – коэффициент эксцесса (куртозис) распределения (приводится «сырой» куртозис; для нормального распределения, где *Kurtosis* = 3.).

Эмпирическая валидация EWS проводилась в климатологии [2, 3], финансах [7] и применительно к техногенным системам [16, 17]; универсальный индикатор не выявлен [7]. К методам обнаружения структурных изменений примыкают подходы на основе информации Фишера [18], CUSUM и BOCPD, не учитывающие трансформацию корреляционной структуры. Применение EWS ограничено [1]: контекстная зависимость выбора индикаторов, потребность в длинных рядах, высокая частота ложных срабатываний, отсутствие стандартного способа интегральной оценки; системы могут временно превышать критические пороги без необратимого перехода [8].

Ни один из рассмотренных методов не обеспечивает комплексной оценки сложности многомерных нестационарных систем. К «идеальному» методу предъявляются требования: а) применимость к многомерным нестационарным данным; б) одновременный учёт статистических и структурных характеристик; в) вычислимость по конечной выборке; г) интерпретируемость как отклонение от нормального режима; д) устойчивость к выбору параметров. Ни энтропия Шеннона, ни алгоритмическая сложность, ни EWS не удовлетворяют всей совокупности требований, что обосновывает необходимость разработки нового подхода.

Феноменологический подход к оценке информационной сложности.

Центральная идея: перед критическим переходом система отклоняется от рабочего режима в трёх аспектах – сдвиг центра и размаха распределения, трансформация межкомпонентных связей, изменение вида распределения [1]. Функция, чувствительная ко всем трём аспектам, служит индикатором нестабильности. Предлагаемый метод сравнивает текущее состояние системы с нормальным режимом через интегральную информационную меру, преодолевая произвол EWS и невычислимость метода Колмогорова.

Под нормальным режимом понимается устойчивое состояние со стационарными математическим ожиданием, дисперсией и корреляционной структурой [19]. Формализация через опорное распределение P_{ref} позволяет численно описать «ожидаемое» поведение и измерять отклонения.

Построение опорного состояния: фиксируется опорный период T_{ref} – интервал, в течение которого система находилась в устойчивом режиме. Из него исключаются аномалии по правилу $|x_i - \mu_i| \leq 3\sigma_i$. По оставшимся данным вычисляются характеристики нормального режима:

$$\mu_{ref} = E[X | t \in T_{ref}], \quad \Sigma_{ref} = Cov(X | t \in T_{ref}), \quad (3)$$

где $\mu_{ref} \in \mathbb{R}^n$ – вектор средних значений опорного распределения P_{ref} ; $\Sigma_{ref} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – ковариационная матрица опорного распределения; $X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$ – многомерный вектор наблюдений; n – размерность вектора состояния; $\mathcal{T}_{ref}$ – множество индексов опорного периода; $E[X | t \in \mathcal{T}_{ref}]$ – выборочное среднее, $Cov(X | t \in \mathcal{T}_{ref})$ – выборочная ковариационная матрица по опорному периоду.

Ковариационная матрица $\Sigma_{ref} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ отражает линейные взаимозависимости: диагональные элементы σ_{ii} – дисперсии переменных, внедиагональные σ_{ij} – ковариации. Параллельно в каждый момент времени t оценивается текущее распределение P_t по скользящему окну.

Обоснование выбора меры расхождения. Среди альтернатив [20] KL-дивергенция несимметрична, расстояние Вассерштейна вычисляется за $O(n^3 \log n)$, дивергенция Реньи требует выбора параметра α . В качестве статистической компоненты используется JS-дивергенция:

$$D_{JS}(P_t \| P_{ref}) = \frac{1}{2} D_{KL}(P_t \| M) + \frac{1}{2} D_{KL}(P_{ref} \| M), \quad (4)$$

где $D_{JS}(P_t \| P_{ref})$ – дивергенция Йенсена-Шеннона между текущим P_t и опорным P_{ref} распределениями; $D_{JS} \in [0, \ln 2] \approx [0; 0,693]$ (в натуральных единицах); $D_{KL}(P \| Q) = \sum p(x) \ln(p(x)/q(x))$ – дивергенция Кульбака-Лейблера; M – совместное распределение; P_t – текущее распределение, оцениваемое по скользящему окну шириной w ; P_{ref} – опорное распределение, определённое по формуле (3).

Выбор JS-дивергенции обусловлен симметричностью, ограниченностью $D_{JS} \in [0, \ln 2]$ (естественная нормировка), метрическими свойствами ($\sqrt{D_{JS}}$ – метрика) [20] и вычислительной эффективностью на уровне KL .

Для многомерных нормальных распределений аналитическое выражение для KL -дивергенции, входящей в (4), имеет вид [21]:

$$D_{KL}(P_t \| P_{ref}) = \frac{1}{2} \left[\ln \frac{|\Sigma_{ref}|}{|\Sigma_t|} + \text{tr}(\Sigma_{ref}^{-1} \Sigma_t) + (\mu_t - \mu_{ref})^T \Sigma_{ref}^{-1} (\mu_t - \mu_{ref}) - n \right], \quad (5)$$

где $\mu_t \in \mathbb{R}^n$ – вектор средних текущего распределения (по окну шириной w); $\Sigma_t \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – ковариационная матрица текущего распределения; μ_{ref} , Σ_{ref} – параметры опорного распределения (см. формулу (3)); $|\Sigma|$ – определитель матрицы Σ ; $\text{tr}(\bullet)$ – след матрицы (сумма диагональных элементов); Σ_{ref}^{-1} – обратная матрица к Σ_{ref} ; n – размерность пространства. Формула (5) справедлива для гауссовского случая $N(\mu_t, \Sigma_t) \| N(\mu_{ref}, \Sigma_{ref})$.

Область применимости гауссова приближения. Выражение (5) предполагает многомерную нормальность; для систем с тяжёлыми хвостами возможна оценка JS методом k -ближайших соседей (k -NN) или предварительное преобразование к нормальности. Используется гауссово приближение для аналитической вычислимости. Поскольку для логарифмических доходностей финансовых активов гипотеза многомерной нормальности, как правило, нарушается (тяжёлые хвосты, асимметрия, гетероскедастичность), гауссова формула (5) в этом случае даёт приближённую оценку,

которую необходимо контролировать. В качестве процедуры верификации предлагается перед расчётом проверять многомерную нормальность опорного распределения тестом Мардиа (по асимметрии и эксцессу) на уровне значимости $\alpha = 0,05$; при отклонении гипотезы нормальности – заменить аналитическую формулу (5) непараметрической оценкой дивергенции D_{JS} методом k ближайших соседей и сопоставить полученные значения. Расхождение аналитической и непараметрической оценок служит количественной мерой систематической погрешности гауссова приближения; при существенном расхождении выводы следует трактовать с учётом этого ограничения.

Структурное расстояние определяется на основе нормы Фробениуса [22]:

$$\Delta_{struct}(\Sigma_t, \Sigma_{ref}) = \frac{\|\Sigma_t - \Sigma_{ref}\|_F}{\|\Sigma_{ref}\|_F}, \quad (6)$$

где $\Delta_{struct} \in [0, +\infty)$ – нормированное структурное расстояние между ковариационными матрицами; Σ_t – ковариационная матрица текущего окна (момент t); Σ_{ref} – ковариационная матрица опорного периода (см. формулу (3)); $\|A\|_F = \sqrt{\sum_{ij} a_{ij}^2}$ – норма Фробениуса матрицы A .

Интегральный показатель информационной сложности определяется как:

$$C_I(t) = D_{JS}(P_t \| P_{ref}) + \lambda \Delta_{struct}(\Sigma_t, \Sigma_{ref}), \quad (7)$$

где $C_I(t)$ – интегральный показатель информационной сложности в момент t ; $C_I(t) \approx 0$ – нормальный режим; $D_{JS}(P_t \| P_{ref})$ – статистическая компонента (см. формулу (4)); λ – адаптивный весовой коэффициент (константа, определяется по формуле (8)); $\Delta_{struct}(\Sigma_t, \Sigma_{ref})$ – структурная компонента (см. формулу (6)).

Адаптивная процедура определения параметров. В формуле (7) присутствуют два параметра: весовой коэффициент λ и размер скользящего окна w . Для устранения экспертного произвола предлагается адаптивная процедура. Обозначим через σ_{JS} и σ_{Δ} стандартные отклонения компонент D_{JS} и Δ_{struct} на опорном периоде. Адаптивный коэффициент:

$$\lambda = \frac{\sigma_{JS}}{\sigma_{\Delta}}, \quad (8)$$

где λ – весовой коэффициент, уравнивающий вклад двух компонент в $C_I(t)$ (вычисляется один раз по опорному периоду и остаётся константой); σ_{JS} – стандартное отклонение D_{JS} на опорном периоде T_{ref} ; σ_{Δ} – стандартное отклонение Δ_{struct} на опорном периоде T_{ref} .

Данная процедура обеспечивает равный вклад обеих компонент в фоновом режиме. Минимальный размер окна $w_{min} \geq 2n^2$, где n – число переменных, что обеспечивает обусловленность ковариационной матрицы. Для повышения устойчивости при ограниченных данных рекомендуется регуляризация Ледуа-Вольфа [23]. Верхний предел определяется требованием стационарности внутри окна.

Интерпретация показателя: при $C_I(t) \approx 0$ система в нормальном режиме; рост $C_I(t)$ свидетельствует об отклонении от нормы; при $C_I(t) \rightarrow \max$ система достигает максимальной нестабильности, что может предвещать критический переход.

Принципиальная новизна предлагаемого подхода: во-первых, введена двухкомпонентная декомпозиция информационной сложности на статистическую (D_{JS}) и структурную (A_{struct}) составляющие, позволяющая разграничить механизм деградации. Во-вторых, адаптивная процедура (8) автоматически определяет весовой коэффициент, что обеспечивает воспроизводимость. В-третьих, введённый показатель доли $r(t)$ формирует «информационный портрет» критического перехода, позволяя классифицировать типы деградации систем различной природы.

Связь с предшествующими работами: спектральные характеристики ковариационной матрицы применялись для индикаторов финансового кризиса [24], а метод single-sample JS-дивергенции (sJSD) [25] – для маргинальных распределений; ни одна из работ не использовала JS и норму Фробениуса совместно с автоматической калибровкой λ . Объединение этих компонент с весом λ (8), доля $r(t)$ как «информационный портрет» (9) и гипотеза о двухфазном механизме (опережение D_{JS} перед A_{struct}) составляют принципиальные элементы новизны.

Критерии сложности на основе интегрального показателя. По аналогии с феноменологическим описанием пространства состояний [9, 10, 19] предлагаются пять операциональных критериев сложности.

Структурная сложность измеряется через $A_{struct}(\Sigma_t, \Sigma_{ref})$; рост означает удаление Σ_t от опорной матрицы; высокие значения характерны для деградации через разрушение корреляционной структуры (системные финансовые кризисы).

Динамическая сложность характеризуется скоростью $\frac{dC_I}{dt}$ и интегралом $\int C_I(t) dt$ – суммарной информационной ёмкостью перехода; критерий – отношение интеграла к длительности (сейсмика даёт резкий рост, климат – плавное накопление).

Системная сложность оценивается долей $r(t) = \frac{\lambda A_{struct}(t)}{C_I(t)}$ в момент максимума C_I : при $r \rightarrow 1$ переход структурный, при $r \rightarrow 0$ – статистический; критерий формирует «информационный портрет» системы [9, 10]. Описательная сложность – число параметров для воспроизведения $C_I(t)$; минимальный размер окна $w_{min} \geq 2n^2$ (при большом n и нелинейных связях необходима регуляризация [23]). Относительная сложность: $C_I(t)$ безразмерна и позволяет сопоставлять системы различной природы [9, 10].

Межсистемные закономерности и функциональные связи. Унифицированный формат эмпирической базы позволяет проводить кросс-доменные сравнения двух типов.

Функциональные связи между доменами: глобальные финансовые кризисы (S&P 500, МОЕХ) сопровождаются макроэкономическими рецессиями и валютными шоками; климатические аномалии влияют на сейсмическую активность через нагрузку на литосферу. Одновременный расчёт $C_I(t)$ по нескольким доменам позволяет оценивать временной лаг межсистемного распространения нестабильности.

Общие статистические закономерности: подтверждение двухфазной динамики деградации (статистический сдвиг $\rightarrow$ структурная трансформация) для систем различной природы свидетельствовало бы об универсальном механизме потери устойчивости.

Гипотезы, подлежащие экспериментальной верификации. На основе предложенного подхода сформулированы следующие гипотезы.

Гипотеза 1. Кросс-доменная инвариантность двухфазного механизма потери устойчивости. В системах различной природы перед критическими переходами наблюдается двухфазная динамика: сначала рост D_{JS} (сдвиг распределения), затем рост A_{struct} (трансформация корреляций). Подтверждение установит универсальный «динамический портрет» деградации. Критерий: временной лаг τ между началом роста D_{JS} и A_{struct} положителен в более чем 75% переходов по всем доменам.

Гипотеза 2. Превосходство интегрального показателя. Показатель $C_I(t)$ обеспечивает статистически значимо более высокую площадь под ROC-кривой по сравнению с лучшим одномерным EWS-индикатором. Критерий: $AUC(C_I) > AUC_{best-EWS} + 0,05$ при $p < 0,05$ по тесту DeLong. Замечание: на доступном однодоменном материале (курсы ЦБ РФ, $C_I(t)$ при $w=252$) данная гипотеза рассматривается как не отвергнутая, но и не подтверждённая; её строгая проверка требует более узких окон и привлечения нескольких предметных областей.

Гипотеза 3. Безразмерное масштабирование временного опережения. Опережение Δt масштабируется временем автокорреляции τ_{corr} : безразмерное отношение $\Delta t / \tau_{corr}$ предполагается статистически неразличимым для разных систем. Критерий: коэффициент вариации по доменам $CV \leq 0,5$ (порог 0,5 – граница умеренного и высокого разброса). Устойчивость отношения указывала бы на универсальный параметр критического замедления; его диапазон определяется по результатам кросс-доменной верификации.

Гипотеза 4. Устойчивость к ложным срабатываниям и эффект размерности. Специфичность метода составляет не менее 0,85 и не убывает с ростом размерности n при фиксированном отношении w/n^2 . Проверка данной гипотезы требует симуляционного исследования с варьированием n .

Гипотеза 5. Доменно-специфичная декомпозиция – «информационный портрет» критического перехода. Для каждой предметной области существует характерная доля структурной компоненты:

$$r(t) = \frac{\lambda A_{struct}(t)}{C_I(t)}, \quad (8)$$

где $r(t) \in [0;1]$ – доля структурной компоненты в показателе $C_I(t)$ (формула (7)); определена только при $C_I(t) > 0$ (в нормальном режиме не вычисляется) и анализируется в момент максимума $C_I(t)$: при $r \rightarrow 1$ переход преимущественно структурный, при $r \rightarrow 0$ – статистический.

Предполагается, что доля $r(t)$ в момент максимума $C_I(t)$ устойчива внутри домена, но статистически значимо различается между доменами. Подтверждение данной гипотезы позволит создать классификацию типов критических переходов по «информационному портрету» деградации – практический инструмент классификации критических переходов. Критерий: дисперсия $r(t)$ внутри домена статистически значимо ниже межгрупповой по тесту Краскела-Уоллиса ($p < 0,05$).

Эмпирическая база для верификации показателя информационной сложности. Универсальность $C_I(t)$ устанавливается при апробации на данных для систем

различной природы. Разработан набор Python-парсеров для загрузки, предобработки и z-нормализации; каждый формирует таблицу $T \times (n+1)$ и файл метаданных.

Структура эмпирической базы: 5 предметных областей, свыше 20 датасетов, размерность от 3 до ~130 переменных, длина рядов 500–15 000 наблюдений, частоты от дневных до годовых.

А. Финансовые рынки. Данные загружаются через yfinance: S&P 500 (+ VIX), NASDAQ, DAX 30, Nikkei 225, Shanghai Composite; BTC, ETH; Brent, золото, медь. Вектор $X(t) = (\text{Price}, \text{LR}, \text{Vol}_{20d}, \text{Volume})$. Критические события: dot-com 2000, МФК 2008, COVID-19 2020, FTX 2022.

В. Климат. Загружаются HadCRUT5 (Met Office), CO₂ (NOAA), SOI (NOAA). Вектор: $X(t) = (\text{Таном}, \text{CO}_2, \text{SOI}, \text{AMO}, \text{PDO})$. Критические события: вулканические похолодания, события Эль-Ниньо.

С. Эпидемиология. Данные COVID-19 из JHU CSSE / Our World in Data. Вектор: $X(t) = (\text{Cases}, \text{Deaths}, \text{Tests}, \text{Vaccinations}, \text{Hospitalizations}, R_0, \text{Mobility})$. Критические события: волны COVID-19 2020–2023 гг.

Д. Сейсмология. Каталог USGS через REST API. Вектор: $X(t) = (\text{Magnitude}, \text{Depth}, \text{Frequency}, \text{CumulativeMoment}, \text{bvalue})$. Критические события: землетрясения $M \geq 6$.

Е. Российские макроэкономические источники. Банк России [26]: ежедневные курсы шести валют (USD, EUR, CNY, GBP, CHF, JPY) через XML API cbr.ru. Московская биржа [27]: IMOEX, RTS, $X(t) = (\text{IMOEX}, \text{RTS}, \text{Volume}, R_0, \text{NumTrades}, \text{BidAskSpread})$. Росстат [28]. Критические события: кризисы 1998, 2008, 2014, 2022 гг.

Сводные характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Источники данных для верификации показателя $C_I(t)$

Группа	База данных	Источник	V	N	h
A	Standard & Poor's 500 Index + CBOE Volatility Index (VIX)	Yahoo Finance (https://finance.yahoo.com)	15 000	5	1 день
	NASDAQ Composite, DAX 40, Nikkei 225, Shanghai Composite		3500–10000	4	1 день
	Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH)		3000	5	1 день
	Brent Crude Oil, Gold, Copper Futures		5000	2	1 день
B	HadCRUT5 + CO ₂ NOAA GML + Southern Oscillation Index	Met Office / NOAA (https://www.metoffice.gov.uk)	2000	5	1 месяц
C	COVID-19 Global Dataset (JHU CSSE)	Our World in Data (https://ourworldindata.org)	1500	7	1 сутки
D	USGS Earthquake Catalog	USGS (https://earthquake.usgs.gov)	10000	5	1 сутки
E	Курсы валют ЦБ РФ (USD, EUR, CNY, GBP, CHF, JPY)	Банк России (https://www.cbr.ru)	6000	6	1 день
	Индексы МосБиржи: IMOEX, RTS	Московская биржа (https://iss.moex.com)	6000	6	1 день
	Краткосрочные показатели Росстат	Росстат (https://rosstat.gov.ru)	300	6	1 месяц

Здесь V – объём выборки (число наблюдений), N – размерность вектора состояния $X(t)$ (число переменных), h – шаг дискретизации временного ряда.

Разнородность предметных областей обеспечивает условия для верификации гипотезы о кросс-доменной инвариантности двухфазного механизма деградации.

Сравнительный анализ методов. В отличие от энтропии Шеннона [4] метод работает с многомерными данными и отслеживает динамику; по сравнению с алгоритмической сложностью [5, 6] – процедуры вычислимы по конечной выборке; по сравнению с одномерными EWS [1] – метод агрегирует статистическую и структурную информацию; в отличие от информации Фишера [18] измеряет глобальное расхождение. Симметричная JS-дивергенция обеспечивает метрические свойства, адаптивная процедура (8) снижает произвол настройки.

Расчётный эксперимент: верификация показателя $C_I(t)$ – на курсах валют ЦБ РФ. Вектор состояния сформирован по ежедневным официальным курсам шести инструментов ЦБ РФ [26]: $X(t) = VV / RUB$, где VV – курсы валют USD, EUR, GBR, CNY, JPY, XAU. Вместо отсутствующего CHF/RUB включена учётная цена золота. Финальный период: 2018–2026 гг. (2000 торговых дней), включая шок марта 2020 г., санкционный шок февраля 2022 г. и девальвацию лета 2023 г.

Предобработка и опорное распределение. Из ценовых рядов сформированы лог-доходности $r_t = 100[\ln(p_t) - \ln(p_{t-1})]$. За опорный период T_{ref} принят 2018 г. (247 торговых дней), после исключения аномалий по правилу (3) оставлено 242 наблюдения. Ковариационная матрица регуляризована по Ледуа-Вольфу [21], $cond(\Sigma_{ref}) = 63$.

Скользящее окно и калибровка λ . Ширина окна $w = 252$ торговых дня превышает $w_{min} \geq 2n^2 = 72$; ($w / w_{min} = 3,5$). Адаптивный коэффициент λ рассчитан по формуле (8) на 2019 г.: $\sigma_{JS} = 0,1285$, $\sigma_A = 0,3159$, $\lambda = 0,4068$. C_I вычислен по (7), $r(t)$ – по (9); используется leading edge (правый край скользящего окна – момент, к которому окно полностью включило событие).

Динамика показателя $C_I(t)$ и идентификация критических переходов. Временной ряд $C_I(t)$ приведен на рисунке 1. В фоновом режиме 2019 г. $C_I \approx 0,3$. Глобальный максимум $C_I(t) = 7,45$ зафиксирован при leading edge 19 января 2023 г., что соответствует периоду полного включения окном санкционного шока 24 февраля 2022 г. Декомпозиция: $D_{JS}(P_t || P_{ref}) = 1,386$ и $\lambda A_{struct} = 6,06$, $r(t_{max}) = 0,81$. Доминирование структурной компоненты отражает перестройку корреляционной архитектуры: рубль девальвировался к недружественным валютам при стабильности к юаню.

Дискриминационная способность показателя (гипотеза 2). Оценка проведена в режиме опережающего обнаружения: положительный класс – окна с leading edge в интервале $[t_{event} - 60, t_{event} - 1]$, активные фазы (от t_{event} до $t_{event} + 120$) исключены. Результирующая out-of-sample выборка: 1187 окон, из них 163 положительных. AUC ROC: $AUC(C_I) = 0,532$; $AUC(D_{JS}) = 0,541$; $AUC(A_{struct}) = 0,527$; $AUC(EWS - Var) = 0,48$; $AUC(EWS - AR(1)) = 0,504$; $AUC(EWS - |Skew|) = 0,448$. Статистическая значимость проверена блочным бутстрепом (2000 итераций, блок = 252): $\Delta AUC(C_I, Var) = +0,044$ [95% ДИ: $-0,014$; $+0,083$], $p = 0,83$. Ни одна разность не достигает совокупного критерия ($AUC > 0,05$ при $p < 0,05$). Гипотеза 2 на одном домене при $w = 252$ не верифицируется: годовое окно методически не способно дать существенного преимущества над одномерным индикатором на горизонтах 1–60 дней; значимое преимущество ожидается при более узких окнах или мультидоменной агрегации. Таким образом, на текущем материале статистически значимого преимущества интегрального показателя над лучшим одномерным индикатором не обнаружено.

($\Delta AUC = +0,044$; $p = 0,83$), и этот результат следует представлять не как гипотезу, ожидающую подтверждения, а как установленное ограничение метода в режиме годового окна на одном домене: гипотеза 2 не отвергнута и переносится на проверку в дизайне с узкими окнами и мультидоменной агрегацией.

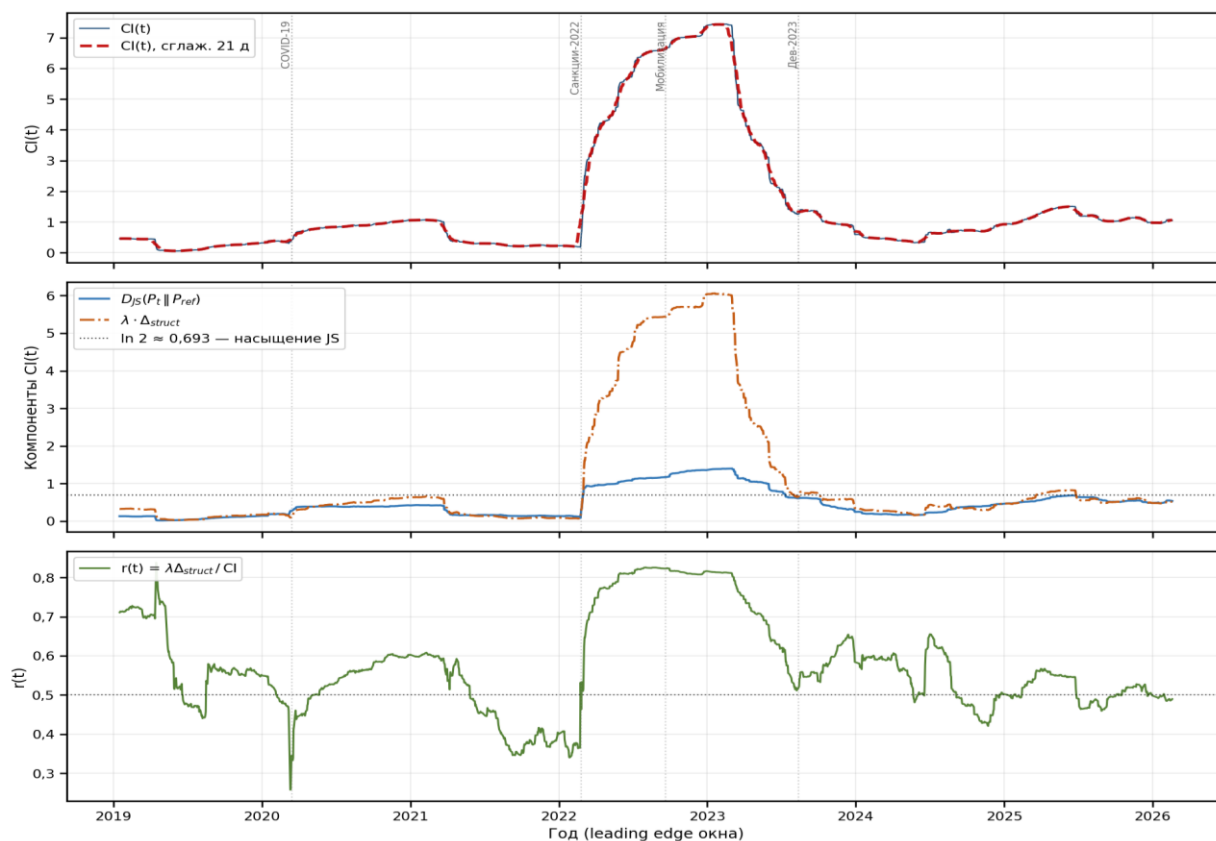


Рис. 1. Динамика интегрального показателя $C_I(t)$, его компонент D_{JS} и $\lambda \Delta_{struct}$ и доли структурной компоненты $r(t)$ для курсов валют ЦБ РФ; ось t – leading edge скользящего окна шириной 252 торговых дня. Источник данных: Банк России [26]; пунктирные вертикали – даты документированных кризисных событий. Расчёт авторов

Информационный портрет переходов (гипотеза 5). Доля $r(t_{max})$ в моменты пиков C_I : 0,60 (COVID-19, декабрь 2020 г.), 0,82 (санкции, декабрь 2022 г.), 0,71 (девальвация, май 2023 г.). Распределения $r(t)$ в окрестностях ± 60 дней от пиков подвергнуты thinning с шагом 21 торговый день. Тест Краскела-Уоллиса: $H=9,85$, $df=2$, $p=0,007$ – статистически значимое различие портретов. COVID-2020 – статистический характер ($r < 0,6$); санкции-2022 – структурный перелом ($r \rightarrow 0,82$); девальвация-2023 – промежуточное положение. Гипотеза 5 подтверждена.

Оценка двухфазной динамики (гипотеза 1). Гипотеза 1 – кросс-доменное утверждение (критерий: $\geq 75\%$ положительных лагов по всем доменам); на одном домене методически непроверяема. На наблюдаемых эпизодах D_{JS} и Δ_{struct} превышают порог $\mu + 2\sigma$ одновременно либо с разрывом ≤ 1 дня – в годовом окне неразрешимо. Полная проверка требует мультидоменной программы.

Ограничения метода, выявленные в эксперименте. Во-первых, в 19,4% окон D_{JS} приближается к $\ln 2 \approx 0,693$ (численному пределу), в таких окнах основным дискриминатором становится $\Delta_{struct}(r(t) > 0,8)$. Во-вторых, $w = 252$ размывает сигнал

на горизонтах 1–60 дней; узкие окна повышают разрешение, но требуют сильнее регуляризации. В-третьих, гауссово приближение для $\log$ -доходностей – упрощение; применение k-NN рассматривается как направление дальнейшей работы.

Анализ чувствительности к ширине окна. Для оценки устойчивости результатов и определения оптимального диапазона w показатель $C_I(t)$ рассчитан также для окон $w=60$ и $w=120$ торговых дней при том же опорном периоде $T_{ref} = 2018г.$ (рис. 2). Сводные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сводка результатов при различной ширине скользящего окна ($T_{ref} = 2018г.$)

Показатель	$w = 60$	$w = 120$	$w = 252$ (базовое)
Адаптивный коэффициент λ	0,336	0,488	0,407
$C_{I,max}$	15,91	15,51	7,45
$r(t_{max})$	0,842	0,881	0,814
Доля окон с насыщением $D_{JS} (\geq 0,99 \ln 2)$	31,3 %	25,1 %	19,4 %
$AUC(C_I)$	0,457	0,461	0,532
Гипотеза 5: Н (Краскел-Уоллис)	35,99 ($p < 0,0001$)	23,14 ($p < 0,0001$)	9,85 ($p = 0,007$)

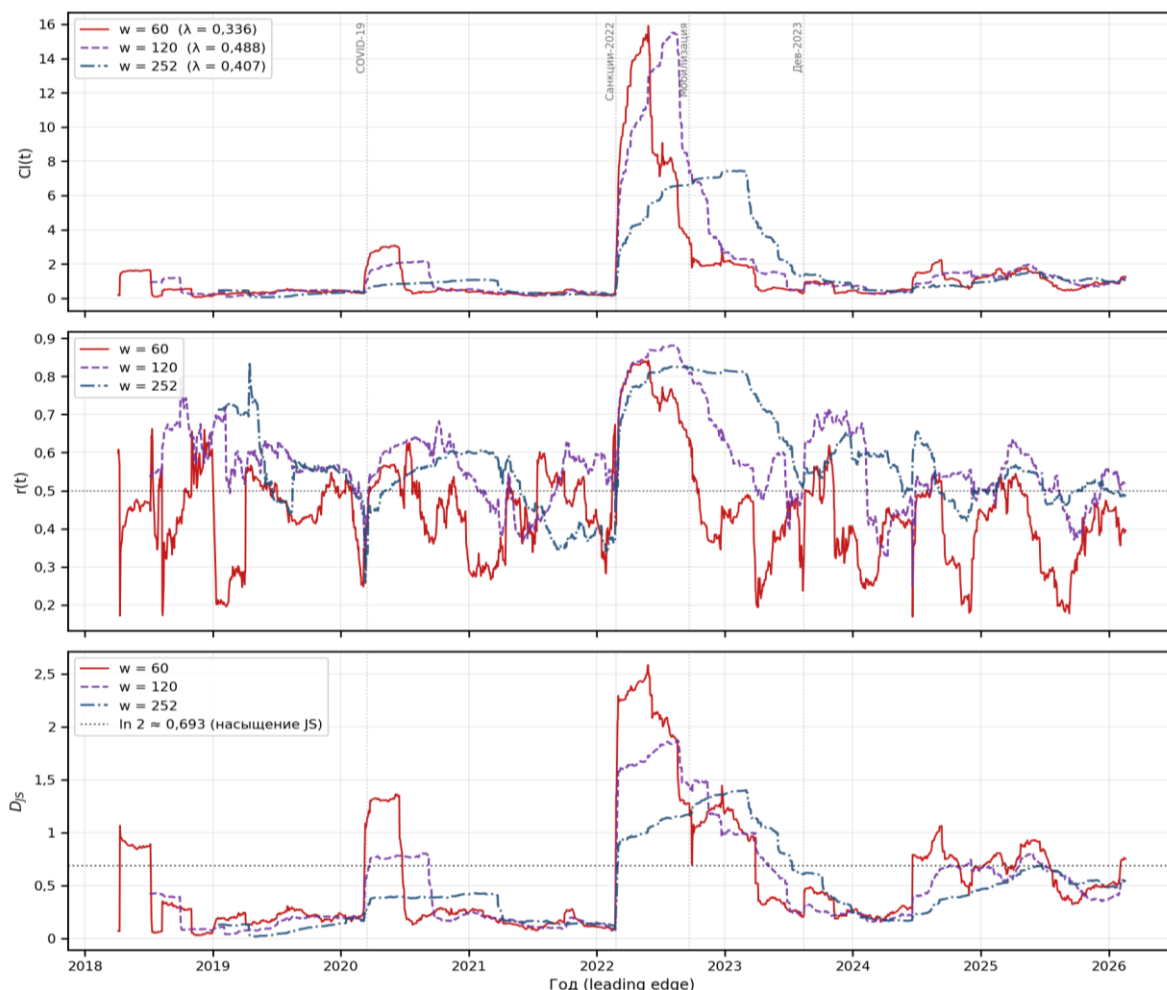


Рис. 2. Чувствительность интегрального показателя $C_I(t)$, доли $r(t)$ и компоненты D_{JS} к ширине скользящего окна $w \in \{60; 120; 252\}$ торговых дней; курсы ЦБ РФ, $T_{ref} = 2018г.$; пунктирная линия – теоретический порог насыщения симметризованной JS-дивергенции $\ln 2 \approx 0,693$

Полученные данные позволяют сделать три вывода. Во-первых, идентификация санкционного шока 2022 г. как наиболее острого и $r(t_{max}) > 0,8$ устойчивы к выбору ширины окна – структурная компонента доминирует на всех трёх масштабах. Во-вторых, статистическая значимость гипотезы 5 резко возрастает при сокращении размера окна: на $w = 60$, $H = 35,99$ ($p < 0,0001$) против $H = 9,85$ ($p = 0,007$) на $w = 252$. В-третьих, гипотеза 2 не подтверждается ни на одном масштабе: при $w = 60$ и $w = 120$ $AUC(C_I)$ снижается из-за численной деградации D_{JS} (доля окон с насыщением $D_{JS} \geq 0,99 \ln 2$ растёт с 19,4% до 31,3%). Таким образом, $w = 252$ – компромисс между численной устойчивостью и разрешающей способностью; более тонкая настройка требует непараметрических оценок дивергенции.

Анализ чувствительности к выбору опорного периода. Для проверки устойчивости результатов к выбору опорного периода T_{ref} расчёт повторён при двух альтернативных вариантах: $T_{ref} = 2019_{г.}$ (стационарный год без локальных санкционных эпизодов 2018 г.) и расширенный $T_{ref} = 2018–2019_{гг.}$ (496 торговых дней). Сводка приведена в таблице 3.

Таблица 3. Чувствительность результатов к выбору опорного периода ($w = 252$)

Показатель	2018 (базовое)	2019	2018–2019
Адаптивный коэффициент λ	0,407	0,187	0,219
$C_{I,max}$	7,45	7,53	6,02
$r(t_{max})$	0,814	0,764	0,747
r на пике COVID-19	0,60	0,56	0,55
r на пике санкций-2022	0,82	0,77	0,75
r на пике девальвации-2023	0,71	0,64	0,62
Гипотеза 5: H, p	9,85 (0,007)	9,85 (0,007)	9,85 (0,007)

Содержательные выводы устойчивы к выбору T_{ref} . Структурный характер санкционного шока ($r > 0,75$), статистический характер COVID-19 ($r < 0,60$) и промежуточное положение девальвации 2023 г. сохраняются; порядок «санкции > девальвация > COVID-19» инвариантен. Тест Краскела-Уоллиса даёт идентичное $H = 9,85$, $p = 0,007$ для всех трёх T_{ref} . (одинаковый ранг $r(t)$ в окрестностях пиков). Численная зависимость λ от T_{ref} . (0,187–0,407) при сохранении $C_{I,max}$ демонстрирует корректную адаптацию метода: при спокойном T_{ref} (2019 г.) меньшая σ_{JS} и большая σ_{Δ} автоматически снижают λ .

Сводные результаты эксперимента. Эмпирическая верификация на курсах валют ЦБ РФ (2018–2026 гг., $n = 6$, $w = 252$) подтверждает: 1) аналитическую вычислимость $C_I(t)$ по формулам (4)–(7) с адаптивной калибровкой $\lambda = 0,4068$ без экспертного вмешательства; 2) количественное описание санкционного шока 2022 г. как наиболее острого эпизода ($C_{I,max} = 7,45$; $r = 0,81$); 3) подтверждение гипотезы 5 (Kruskal-Wallis $H = 9,85$, $p = 0,007$ после thinning): разные критические переходы в одном домене статистически значимо различаются по соотношению компонент; 4) гипотезы 1 и 2 на одном домене не верифицируемы методически и требуют кросс-доменной программы; 5) устойчивость содержательных выводов к ширине окна $w \in \{60; 120; 252\}$ и опорному периоду $T_{ref} \in \{2018; 2019; 2018–2019\}$ – структурный характер санкционного шока ($r > 0,75$) и статистическая значимость гипотезы 5 ($p \leq 0,007$ для всех конфигураций) сохраняются во всех проверенных вариантах, причём на узких окнах разрешающая способность гипотезы 5 существенно возрастает ($H = 35,99$ при $w = 60$).

Выводы. Проведенный систематический анализ трёх подходов к оценке сложности систем – энтропийного, алгоритмического и метода ранних предупреждающих сигналов показал, что существующие методы обладают ограниченной универсальностью при применении к реальным многомерным нестационарным данным.

Предложен феноменологический подход к оценке информационной сложности, отличающийся: а) использованием симметризованной JS-дивергенции с метрическими свойствами; б) двухкомпонентной декомпозицией сложности на статистическую и структурную составляющие, выявляющей механизм деградации; в) адаптивной процедурой автоматического определения весового коэффициента; г) введением понятия «информационного портрета» критического перехода как доменно-специфического соотношения компонент.

Сформулирована система критериев по пяти аспектам сложности: структурному, динамическому, системному, описательному и относительному. Унифицированная эмпирическая база позволяет выявлять как функциональные связи между доменами, так и общие закономерности, инвариантные к физической природе системы.

Расчётный эксперимент на курсах валют ЦБ РФ (2018–2026 гг., $n=6$, $w=252$) подтвердил работоспособность метода. $C_I(t)$ зафиксировал санкционный шок 2022 г. как наиболее острый ($C_{I,max}=7,45$; $r=0,81$); декомпозиция (9) идентифицировала его как структурный, в отличие от пандемии 2020 г. ($r=0,60$) и девальвации 2023 г. ($r=0,71$). Тест Краскела-Уоллиса ($H=9,85$, $p=0,007$) подтвердил гипотезу 5; адаптивная процедура дала $\lambda=0,4068$ без экспертного вмешательства. Анализ чувствительности к $w \in \{60; 120; 252\}$ и $T_{ref} \in \{2018; 2019; 2018-2019\}$ подтвердил робастность; при $w=60$ $H=35,99$ ($p<0,0001$), но насыщение D_{JS} возрастает до 31 %, что определяет $w=252$ как оптимальный компромисс. Гипотезы 1 и 2 требуют расширения на остальные домены.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Early-warning signals for critical transitions / M. Scheffer, V. Dakos, E. H. Van Nes [et al.] // Nature. – 2009. – Vol. 461, No. 7260. – P. 53–59. – DOI 10.1038/nature08227.
2. Lenton, T. M. Tipping elements in the Earth's climate system / T. M. Lenton, H. Held, E. Kriegler // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 2008. – Vol. 105, No. 6. – P. 1786–1793. – DOI 10.1073/pnas.0705414105.
3. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change / V. Dakos, M. Scheffer, E. H. Van Nes [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 2008. – Vol. 105, No. 38. – P. 14308–14312. – DOI 10.1073/pnas.0802430105.
4. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – P. 379–423. – DOI 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
5. Колмогоров, А. Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» / А. Н. Колмогоров // Проблемы передачи информации. – 1965. – Т. 1, № 1. – С. 3–11.
6. Chaitin, G. J. Information-Theoretic Limitations of Formal Systems / G. J. Chaitin // Journal of the ACM. – 1974. – Vol. 21, No. 3. – P. 403–424. – DOI 10.1145/321832.321839.
7. Evaluating the performance of multivariate indicators of resilience loss / E. Weinans [et al.] // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – Art. 9148. – 14 p. – DOI 10.1038/s41598-021-87839-y.
8. Overshooting tipping point thresholds / P. D. L. Ritchie [et al.] // Nature. – 2021. – Vol. 592, No. 7855. – P. 517–523. – DOI 10.1038/s41586-021-03263-2.
9. Аверин, Г. В. Системодинамика: теория и приложения / Г. В. Аверин. – Донецк: ООО «НПП «Фолиант», 2022. – 535 с. – ISBN 978-5-6047945-0-0. – EDN LJDBFI.
10. Звягинцева, А. В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем / А. В. Звягинцева. – Москва: Издательский дом «Спектр», 2016. – 257 с. – ISBN 978-5-4442-0120-6. – EDN AXBXXZ.

11. Richman, J. S. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy / J. S. Richman, J. R. Moorman // *American Journal of Physiology*. – 2000. – Vol. 278, No. 6. – P. H2039–H2049. – DOI 10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039.
12. Bandt, C. Permutation entropy / C. Bandt, B. Pompe // *Physical Review Letters*. – 2002. – Vol. 88, No. 17. – P. 174102. – DOI 10.1103/PhysRevLett.88.174102.
13. Costa, M. Multiscale entropy analysis / M. Costa, A. L. Goldberger, C.-K. Peng // *Physical Review Letters*. – 2002. – Vol. 89, No. 6. – P. 068102. – DOI 10.1103/PhysRevLett.89.068102.
14. Cilibrasi, R. Clustering by compression / R. Cilibrasi, P. M. Vitanyi // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2005. – Vol. 51, No. 4. – P. 1523–1545. – DOI 10.1109/TIT.2005.844059.
15. Pincus, S. M. Approximate entropy as a measure of system complexity / S. M. Pincus // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 1991. – Vol. 88, No. 6. – P. 2297–2301. – DOI 10.1073/pnas.88.6.2297.
16. Звягинцева, А. В. Выявление взаимосвязи сложных событий на примере анализа статистических данных о чрезвычайных ситуациях / А. В. Звягинцева, Т. К. Гучмазова, Р. В. Клеменюк // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. – 2024. – № 3. – С. 45–54. – DOI 10.5281/zenodo.14018559. – EDN QUAUIC.
17. Звягинцева, А. В. Анализ моделей классификации для распознавания прецедентных событий в технологических процессах добычи нефти и газа / А. В. Звягинцева, И. Ю. Ковалев // *Проблемы искусственного интеллекта*. – 2025. – № 2(37). – С. 66–78. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-66-78.
18. Prokopenko, M. Relating Fisher information to order parameters / M. Prokopenko [et al.] // *Physical Review E*. – 2011. – Vol. 84, No. 4. – P. 041116. – DOI 10.1103/PhysRevE.84.041116.
19. Аверин, Г. В. Феноменологический подход к комплексной оценке сложности многомерных систем / Г. В. Аверин, А. В. Звягинцева, А. Р. Бражников // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. – 2026. – № 1. – С. 124–140. – DOI 10.1109/18.61115. – EDN WSFTVO.
20. Lin, J. Divergence measures based on the Shannon entropy / J. Lin // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1991. – Vol. 37, No. 1. – P. 145–151. – DOI 10.5281/zenodo.19201881.
21. Bishop, C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning* / C. M. Bishop. – New York: Springer, 2006. – 738 p. – P. 55–56, 93–94. – ISBN 978-0-387-31073-2.
22. Golub, G. H. *Matrix Computations* / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – 4th ed. – Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2013. – 780 p. – P. 69–71. – ISBN 978-1-4214-0794-4.
23. Ledoit, O. Honey, I shrunk the sample covariance matrix / O. Ledoit, M. Wolf // *The Journal of Portfolio Management*. – 2004. – Vol. 30, No. 4. – P. 110–119. – DOI 10.3905/jpm.2004.110.
24. Kornprobst, A. Winning investment strategies based on financial crisis indicators / A. Kornprobst, R. Douady // *Journal of Investment Strategies*. – 2019. – Vol. 8, No. 2. – P. 1–28.
25. Identifying critical states of complex diseases by single-sample Jensen-Shannon divergence / J. Yan, P. Li, R. Gao [et al.] // *Frontiers in Oncology*. – 2021. – Vol. 11. – Art. 684781. – DOI 10.3389/fonc.2021.684781.
26. Центральный банк Российской Федерации. Статистические данные в формате XML [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cbr.ru/development/SXML/> (дата обращения 07.03.2026).
27. Moscow Exchange. ISS Informational & Statistical Server [Electronic resource]. – URL: <https://iss.moex.com/> (дата обращения 07.03.2026).
28. Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации (Росстат) [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 07.03.2026).

REFERENCES LIST

1. Early-warning signals for critical transitions / M. Scheffer, V. Dakos, E. H. Van Nes [et al.] // *Nature*. – 2009. – Vol. 461, No. 7260. – P. 53–59. – DOI 10.1038/nature08227.
2. Lenton, T. M. Tipping elements in the Earth's climate system / T. M. Lenton, H. Held, E. Kriegler // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 2008. – Vol. 105, No. 6. – P. 1786–1793. – DOI 10.1073/pnas.0705414105.
3. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change / V. Dakos, M. Scheffer, E. H. Van Nes [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 2008. – Vol. 105, No. 38. – P. 14308–14312. – DOI 10.1073/pnas.0802430105.
4. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // *Bell System Technical Journal*. – 1948. – Vol. 27. – P. 379–423. – DOI 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
5. Kolmogorov, A. N. Tri podkhoda k opredeleniiu poniatia «kolichestvo informatsii» / A. N. Kolmogorov // *Problemy peredachi informatsii*. – 1965. – Т. 1, № 1. – С. 3–11.
6. Chaitin, G. J. Information-Theoretic Limitations of Formal Systems / G. J. Chaitin // *Journal of the ACM*. – 1974. – Vol. 21, No. 3. – P. 403–424. – DOI 10.1145/321832.321839.

7. Evaluating the performance of multivariate indicators of resilience loss / E. Weinans [et al.] // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – Art. 9148. – 14 p. – DOI 10.1038/s41598-021-87839-y.
8. Overshooting tipping point thresholds / P. D. L. Ritchie [et al.] // Nature. – 2021. – Vol. 592, No. 7855. – P. 517–523. – DOI 10.1038/s41586-021-03263-2.
9. Averin, G. V. Sistemodinamika: teoriia i prilozheniia / G. V. Averin. – Donetsk: ООО «NPP «Foliant», 2022. – 535 s. – ISBN 978-5-6047945-0-0. – EDN LJDBFI.
10. Zviagintseva, A. V. Veroiatnostnye metody kompleksnoi otsenki prirodno-antropogennykh sistem / A. V. Zviagintseva. – Moskva: Izdatelskii dom «Spektr», 2016. – 257 s. – ISBN 978-5-4442-0120-6. – EDN AXBXXZ.
11. Richman, J. S. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy / J. S. Richman, J. R. Moorman // American Journal of Physiology. – 2000. – Vol. 278, No. 6. – P. H2039–H2049. – DOI 10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039.
12. Bandt, C. Permutation entropy / C. Bandt, B. Pompe // Physical Review Letters. – 2002. – Vol. 88, No. 17. – P. 174102. – DOI 10.1103/PhysRevLett.88.174102.
13. Costa, M. Multiscale entropy analysis / M. Costa, A. L. Goldberger, C.-K. Peng // Physical Review Letters. – 2002. – Vol. 89, No. 6. – P. 068102. – DOI 10.1103/PhysRevLett.89.068102.
14. Cilibrasi, R. Clustering by compression / R. Cilibrasi, P. M. Vitanyi // IEEE Transactions on Information Theory. – 2005. – Vol. 51, No. 4. – P. 1523–1545. – DOI 10.1109/TIT.2005.844059.
15. Pincus, S. M. Approximate entropy as a measure of system complexity / S. M. Pincus // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 1991. – Vol. 88, No. 6. – P. 2297–2301. – DOI 10.1073/pnas.88.6.2297.
16. Zviagintseva, A. V. Vyavlenie vzaimosvizi slozhnykh sobytii na primere analiza statisticheskikh dannykh o chrezvychainykh situatsiiakh / A. V. Zviagintseva, T. K. Guchmazova, R. V. Klemenjuk // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 3. – S. 45–54. – DOI 10.5281/zenodo.14018559. – EDN QAUAIC.
17. Zviagintseva, A. V. Analiz modelei klassifikatsii dlia raspoznavaniia pretsedentnykh sobytii v tekhnologicheskikh protsessakh dobychi nefti i gaza / A. V. Zviagintseva, I. Iu. Kovalev // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2025. – № 2(37). – S. 66–78. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-66-78.
18. Prokopenko, M. Relating Fisher information to order parameters / M. Prokopenko [et al.] // Physical Review E. – 2011. – Vol. 84, No. 4. – P. 041116. – DOI 10.1103/PhysRevE.84.041116.
19. Averin, G. V. Fenomenologicheskii podkhod k kompleksnoi otsenke slozhnosti mnogomernykh sistem / G. V. Averin, A. V. Zviagintseva, A. R. Brazhnikov // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki. – 2026. – № 1. – S. 124–140. – DOI 10.1109/18.61115. – EDN WSFTVO.
20. Lin, J. Divergence measures based on the Shannon entropy / J. Lin // IEEE Transactions on Information Theory. – 1991. – Vol. 37, No. 1. – P. 145–151. – DOI 10.5281/zenodo.19201881.
21. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. – New York: Springer, 2006. – 738 p. – P. 55–56, 93–94. – ISBN 978-0-387-31073-2.
22. Golub, G. H. Matrix Computations / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – 4th ed. – Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2013. – 780 p. – P. 69–71. – ISBN 978-1-4214-0794-4.
23. Ledoit, O. Honey, I shrunk the sample covariance matrix / O. Ledoit, M. Wolf // The Journal of Portfolio Management. – 2004. – Vol. 30, No. 4. – P. 110–119. – DOI 10.3905/jpm.2004.110.
24. Kornprobst, A. Winning investment strategies based on financial crisis indicators / A. Kornprobst, R. Douady // Journal of Investment Strategies. – 2019. – Vol. 8, No. 2. – P. 1–28.
25. Identifying critical states of complex diseases by single-sample Jensen-Shannon divergence / J. Yan, P. Li, R. Gao [et al.] // Frontiers in Oncology. – 2021. – Vol. 11. – Art. 684781. – DOI 10.3389/fonc.2021.684781.
26. Tsentralnyi bank Rossiiskoi Federatsii. Statisticheskie dannye v formate XML [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://www.cbr.ru/development/SXML/> (data obrashcheniia 07.03.2026).
27. Moscow Exchange. ISS Informational & Statistical Server [Electronic resource]. – URL: <https://iss.moex.com/> (data obrashcheniia 07.03.2026).
28. Federalnaia sluzhba gosudarstvennoi statistiki Rossiiskoi Federatsii (Rosstat) [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (data obrashcheniia 07.03.2026).

Поступила в редакцию 12.03.2026 г., рекомендована к изданию 03.04.2026 г.

INTEGRAL INDICATOR OF INFORMATION COMPLEXITY OF MULTIDIMENSIONAL
SYSTEMS BASED ON JS-DIVERGENCE AND STRUCTURAL DISTANCE

Zviagintseva A.V., Brazhnikov A.R.

A systematic analysis of three approaches to complexity assessment is presented: Shannon entropy, Kolmogorov algorithmic complexity, and early warning signals. It is shown that existing methods have limited universality for nonstationary multidimensional systems. The central contribution is a phenomenological approach that assesses complexity as the deviation of the system's current state from a reference (normal) regime. An integral information complexity indicator is proposed, based on an adaptive combination of the symmetrized Jensen-Shannon divergence and the normalized Frobenius structural distance. An automatic procedure for determining the weight coefficient is introduced. The hypothesis of cross-domain invariance of the two-phase degradation mechanism is formulated. An empirical base of five subject domains is compiled for experimental verification. A computational experiment on the Bank of Russia exchange rates for 2018–2026 (252-day window) identified the 2022 sanction shock as the most acute episode and confirmed the hypothesis of domain-specific decomposition (Kruskal-Wallis test).

Keywords: complexity, entropy, information measure, critical transitions, Jensen-Shannon divergence, multidimensional analysis, phenomenological model.

Звягинцева Анна Викторовна

доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО
«Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: a.zviagintseva@donnu.ru

Zviagintseva Anna Viktorovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at Department of Computer Technologies
of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2218-9230>

Бразжников Андрей Романович

стажёр-исследователь ФГБОУ ВО «Донецкий
государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: yanox123321@gmail.com

Brazhnikov Andrei Romanovich

Intern Researcher of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4420-9206>

АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРКИ ДВЕРЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

© 2026 Недоедко А.О., Сухоруков С.И.

Данная работа направлена на разработку автоматизированной системы по сборке дверей летательных аппаратов на базе роботизированного комплекса, которая будет учитывать особенности конструкции дверей и обеспечивать возможность их автоматизированной сборки, включая выполнение операций промежуточного контроля качества. В работе выполнен анализ технологии сборки дверей; проанализированы варианты реализации крепления набора заготовок для их перемещения; предложена структура автоматизированной системы, включающая промышленный робот-манипулятор для перемещения двери относительно сборочного оборудования; разработана структура системы управления, определены способы информационного взаимодействия между элементами системы, разработаны алгоритмы работы системы управления. Предлагаемая система позволит автоматизировать процесс сборки дверей летательных аппаратов, что обеспечит стабильность качества и производительность их сборки.

Ключевые слова: автоматизированная система, роботизированный комплекс, летательный аппарат, сборка дверей самолётов, рама для заготовок, алгоритмы работы системы, система смещения заготовок.

Введение. Автоматизация сборки дверей летательных аппаратов (ЛА) является важной технологической задачей. На данный момент при производстве самолётов 40% работы выполняется с применением человеческого труда [1]. В эти 40% входит и сборка дверей летательных аппаратов. При этом использование ручного труда на производстве может вызывать ряд трудностей, создаваемых человеческим фактором, так как человек может ошибаться и его скорость работы меняется в зависимости от морального и физиологического состояния. Это влечёт за собой колебания скорости производства и появление бракованных изделий, что в свою очередь увеличивает денежные и временные потери, из-за необходимости переделки деталей.

Поэтому для повышения точности и скорости, при создании воздушных судов, необходимо автоматизировать процессы производства дверей летательных аппаратов, внедряя роботизированные комплексы на сборочные линии. Такие комплексы смогут быстрее и точнее выполнять операции сверления, зенковки и клёпки, уменьшая денежные потери, увеличивая скорость производства и повышая качество собираемых изделий, что сведёт появление брака к минимуму.

В данной статье предложен один из вариантов автоматизированной системы на базе роботизированного комплекса для сборки дверей ЛА. Система позволит увеличить скорость производства дверей ЛА и снизить количество брака.

Анализ особенностей конструкции и технологии сборки дверей. Конструктивно двери и люки самолётов состоят из внешнего дверного полотна (находящегося снаружи самолёта) сформированного под необходимую геометрию самолёта, внутреннего дверного полотна (находящегося внутри самолёта), нескольких несущих балок (силового каркаса), расположенных на расстоянии друг от друга и зажатых между внутренним и внешним листами обшивки, а также дополнительных элементов в виде петель, навесов, механизма открытия/закрытия, внутренних коммуникаций и т.д.

Силовой каркас двери собирается из отдельных фрагментов(рёбер), при этом сначала рёбра должны быть приклепаны друг к другу и только затем к ним клепаются лист обшивки [2]. Основные трудности при автоматизации сборки дверей возникают

именно на этапе клёпки листа внешней обшивки к силовому каркасу.

Требования, предъявляемые при сборке дверей летательного аппарата [3]:

- При сборке дверей и люков применяется большое количество заклёпок, которые должны иметь между собой малое расстояние [4].

- Шляпки заклёпок должны быть выровнены с поверхностью листа обшивки, не должны сильно выступать и проваливаться. В случае, если шляпка заклёпки будет выступать, то для такой заклёпки применяется фрезерование, которое потом выравнивает шляпку заклёпки.

- Дверь имеет выпуклую форму. Для того чтобы единичная заклёпка заклепалась с необходимым качеством, нужно точно выдерживать расположение инструментов перпендикулярно листу обшивки. Поэтому позиционирование аппарата для клёпки характеризуется повышенной сложностью. При перемещении к каждой следующей клёпке необходимо не только смещать инструмент параллельным переносом, но ещё и менять ориентацию двери в пространстве из-за наличия элементов, перекрывающих доступ к местам расположения клёпок.

На действующих авиастроительных производствах в России используется ручная сборка дверей, при которой конструкция двери собирается в специальном стапеле [5]. Зачастую клёпка производится ударным методом, последовательностью ударов, которые сминают заклёпки до необходимой формы. При этом с точки зрения прочности и качества такие операции наиболее предпочтительно выполнять единичным сдавливанием без ударов [6, 7].

Сборка, выполняемая вручную, приводит к увеличению доли брака, связанного с высокой сложностью удержания нормали инструмента к поверхности при сверлении, зенковке и клёпке [8].

Технология сборки двери самолёта заключается в ряде последовательных действий. Сначала листовую заготовку двери закрепляют в раме и фиксируют. Затем поочерёдно просверливают отверстия в заготовке. Созданные отверстия зенкуются, тем самым создавая конусообразные углубления для шляпок заклёпок. В некоторых случаях между силовым каркасом и листом обшивки, а также – в отверстия для установки заклёпок, добавляется специальный герметик. Далее в каждое отверстие устанавливаются заклёпки и специальным прессовым оборудованием выполняется клёпка двери летательного аппарата [9]. Все приведённые операции выполняются человеком вручную, из-за чего каждое просверленное отверстие и склёпанная заклёпка получают индивидуальными и разными, что не всегда соответствует технологическим требованиям к сборке дверей самолётов [10].

После выполнения сборочных операций соответствие заклёпок технологическим требованиям проверяется специальным оборудованием и заклёпки сильно выступающие за грани поверхности фрезеруются до состояния, когда шляпки заклёпок будут идти вровень с внешней обшивкой.

Разработка автоматизированной системы на базе роботизированного комплекса. С учетом вышеизложенного, к разрабатываемой автоматизированной системе для сборки дверей летательных аппаратов предъявляются следующие требования:

- Так как имеются труднодоступные места для клёпки необходимо обеспечивать возможность переориентировать деталь в пространстве.

- Так как есть требования по тому, что необходимо выдерживать нормаль инструмента к поверхности, - механика автоматизированной системы должна обеспечивать возможность вращения детали к позиционированию её во всех возможных

направлениях. Помимо перемещения детали вдоль осей X , Y , Z она так же должна иметь возможность вращаться вокруг всех трёх осей с программным заданием углов наклона. Для этих целей наиболее подходящим вариантом на сегодняшний день является применение промышленного робота-манипулятора.

- Смена ориентации заготовки должна производиться прямо в процессе работы, при переходах между точками клёпки.

- Комплекс должен позволять производить контроль качества клепки, выявление дефектов, фрезерование выступающих головок заклепок.

- Так как клёпка листов обшивки к каркасу происходит по всей поверхности максимально равномерно, то должен быть обеспечен доступ ко всем областям заготовки. Не должно быть областей, в которые невозможно установить и заклепать заклёпку.

- Важными требованиями с точки зрения качества итогового изделия являются требования к итоговой геометрии заклепок – имеются ограничения на возможный диапазон выступания шляпок заклепок за пределы поверхности листа обшивки, а также требования к форме, размерам и отсутствию трещин на замыкающих головках заклепок. Поэтому автоматизированная система должна быть оснащена системой контроля качества клепки.

- Так как инструменты, применяемые при сборке дверей, обладают высокой массой и большими габаритами, при автоматизации процесса разместить их на фланце промышленного робота не представляется возможным. Поэтому на фланце робота будет закрепляться специальная рама с набором заготовок (элементов двери), которую робот в дальнейшем будет позиционировать относительно стационарно установленного рядом с ним инструмента.

Крепление рамы с набором заготовок к роботу может быть реализовано двумя способами: в первом способе робот будет захватывать раму с заготовками с торца (рис. 1а), а во втором случае захват рамы с заготовками роботом будет осуществляться за отдельную перекладину сверху над центром заготовок (рис. 1б).

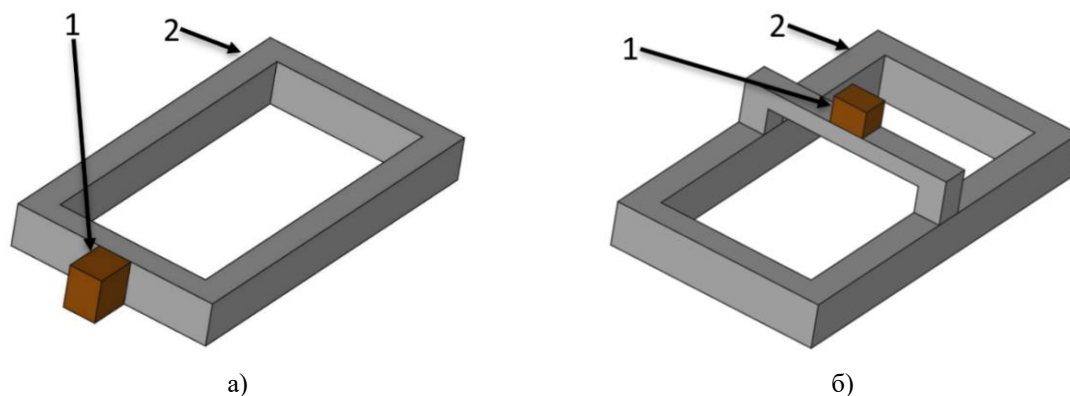


Рис. 1. Места захвата рамы роботом (1 – место захвата, 2 – рама):

а) захват рамы роботом с торца; б) захват рамы роботом за отдельную перекладину сверху

При захвате заготовки роботом с торца (рис. 1а) - центр тяжести значительно удален от фланца робота, что приводит к повышению требований к грузоподъемности робота.

При захвате заготовки над центром (рис. 1б) – центр тяжести распределяется равномерно, в связи с чем масса заготовки может быть увеличена, либо может использоваться менее грузоподъемный робот, что значительно удешевляет систему. Габариты собираемых дверей современных гражданских самолетов могут достигать, а иногда и превышать 2*2 м [11]. Поэтому дальнейшая разработка системы будет выполняться с использованием второго варианта (рис. 1б).

При использовании крепления над центром заготовки важным ограничением является необходимость обеспечения доступа ко всей поверхности заготовки. В случае, если крепление выполнено в виде неподвижной конструкции, центральная часть заготовки перекрыта фланцем робота и элементами крепления (рис. 2). Поэтому для обеспечения доступа ко всей поверхности необходимо применение оснастки, позволяющей смещать раму с заготовкой относительно фланца робота.

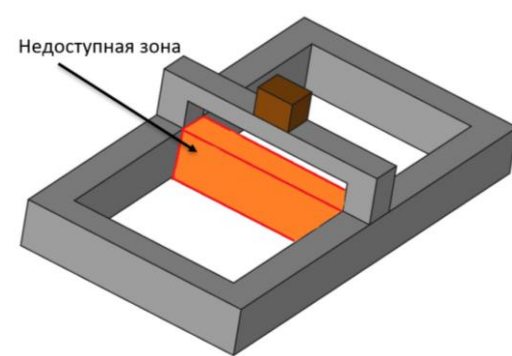


Рис. 2. Зона, недоступная для инструментов

Так как рама с закрепленной в ней заготовкой из-за ограничения по допустимой массе обладает ограниченной жесткостью, в процессе перемещения и при смене ориентации в пространстве возможно возникновение механических деформаций рамы. Для устранения этой проблемы могут применяться дополнительные системы в виде наборов датчиков, измеряющих деформацию рамы с заготовкой, чтобы в дальнейшем компенсировать возникающие изгибы и повысить точность сборки.

На основании вышеизложенного была разработана структура автоматизированной системы для сборки дверей на базе роботизированного комплекса представленная в виде функциональной схемы на рисунке 3.

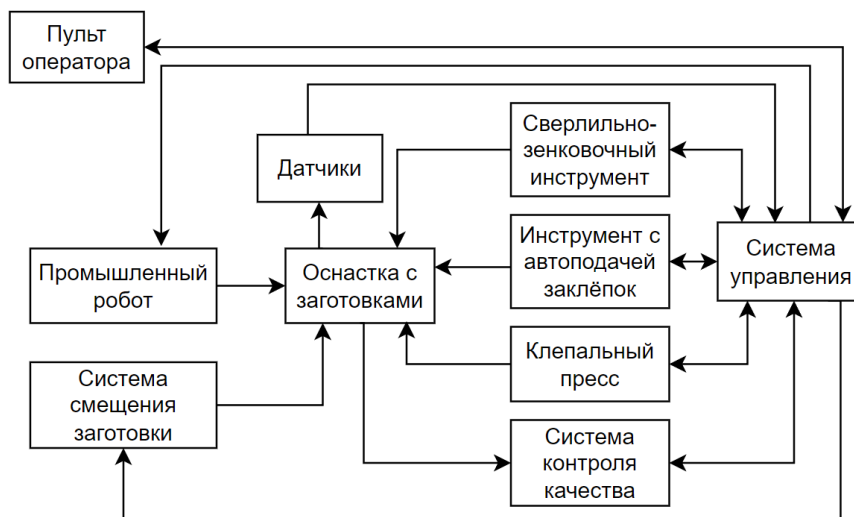


Рис. 3. Функциональная схема автоматизированной системы для сборки дверей на базе роботизированного комплекса

С пульта оператора осуществляется запуск и остановка работы системы, а также взаимодействие с оператором. Система управления осуществляет управление всеми отдельными узлами системы: промышленным роботом, системой смещения заготовки,

сверлильно-зенковочным инструментом, инструментом с автоподачей заклёпок, клепальным прессом, системой контроля качества, получает и обрабатывает информацию с датчиков, расположенных на оснастке с заготовками. Оснастка с заготовками – рама с расположенными на ней наборами датчиков, в которой закреплён набор заготовок дверного полотна. Применяется для закрепления и удержания набора заготовок в требуемой геометрической форме. Датчики – наборы датчиков, расположенные на раме с заготовками, предназначенных для оценки текущих параметров технологического процесса и измерения степени деформаций. Промышленный робот – используется для удержания, перемещения и позиционирования оснастки с заготовками в процессе сборки. Система смещения заготовки – смещает заготовку относительно робота, чтобы предоставить инструментам доступ в недоступную зону, изображённую на рисунке 2. Сверлильно-зенковочный инструмент – выполняет сверление отверстий в заготовке и зенковку, создавая конусообразное углубление для заклёпок с требуемой точностью заглубления. Инструмент с автоподачей заклёпок – устанавливает заклёпки в раннее просверленные и зазенкованные отверстия. Клепальный пресс – осуществляет клепку путем сжатия установленных заклёпок. Система контроля качества – выполняет проверку установленных заклёпок на наличие дефектов (неравномерность формы головок, наличие трещин, высота выступания над плоскостями и т.д.).

Разработка системы управления. Для разрабатываемой автоматизированной системы необходима система управления, которая будет построена по иерархическому принципу – для управления отдельными устройствами будут использоваться локальные системы управления, подчиненные единой системе управления верхнего уровня.

Проведем анализ возможных вариантов реализации локальных систем управления для элементов предложенной структуры.

Так как управление промышленным роботом (приводами, входящими в механическую часть робота) требует сложных вычислений, решения задач прямой/обратной кинематики – для этого используется штатный контроллер робота, который обрабатывает эти операции. Для того чтобы робот перемещался по необходимой траектории в процессе перемещения заготовки, задание этой траектории может быть реализовано двумя различными способами:

1. В виде программы, записанной в контроллере робота;
2. Может использоваться режим внешнего управления, когда контроллер робота ожидает от вышестоящего контроллера команды на перемещение.

В первом случае последовательность перемещений является жёсткой и не может быть при необходимости оперативно скорректирована. Например, если потребуются остановить процесс обработки и извлечь заготовку из станка для проведения техобслуживания. Второй вариант обеспечивает большую гибкость в формировании и коррекции траектории, включая возможность ее изменения в произвольные моменты времени при необходимости (проведение обслуживания и т.д.). Поэтому контроллер робота будет использоваться в режиме внешнего управления. В качестве вышестоящего контроллера, будет использоваться центральный программируемый логический контроллер (ЦПЛК), который, помимо задания команд на перемещение робота, будет управлять и локальными системами управления всего остального оборудования.

Система смещения заготовки также оснащается своей локальной системой управления, которая получает команды от ЦПЛК, преобразует в набор управляющих сигналов, входящих в состав системы приводов и тормозов, за счёт чего осуществляется перемещение.

В качестве сверлильно-зенковочного инструмента будет использоваться разновидность станка с ЧПУ, также имеющего свою локальную систему управления, для которой будут формироваться управляющие команды со стороны ЦПЛК.

Инструмент с автоподачей заклёпок также должен быть оснащён своим отдельным контроллером для управления, так как для его корректного функционирования будет необходимо выполнять и контролировать большое количество процессов и встроенных исполнительных устройств. Внутренняя структура такой локальной системы управления также может состоять из нескольких уровней, однако с точки зрения ЦПЛК взаимодействие с данной системой будет происходить, как с одним устройством, поэтому ее внутренняя структура в данной статье рассматриваться не будет.

В качестве клепального пресса возможны два варианта оборудования: клепальный инструмент, применяющий ударный метод, либо безударное сдавливание. Исходя из технических требований к процессу сборки дверей и авиационных конструкций, заклёпывание ударным методом может приводить к повышенным вибрациям, смещениям и как результат – к пониженной прочности соединения. Поэтому для обеспечения наилучших технических характеристик соединения будет использоваться пресс сдавливающего типа. Клепальный пресс также будет иметь свою локальную систему управления в виде отдельного контроллера, который будет принимать команды от ЦПЛК и в соответствии с получаемыми командами осуществлять управление сжатием с регулированием усилия. Клепальный пресс будет оснащён системой смены насадок, формирующих определённую геометрию шляпки заклёпки. Также он может быть оснащён системами поворота насадок в различных направлениях для облегчения доступа к труднодоступным местам.

Система контроля качества помимо измеряемых величин (высота выступания головки заклёпки над поверхностью, ширина головки и т.д.) должна выявлять также и качественные характеристики, такие как: наличие трещин, искажение геометрической формы головки заклёпки и т.д. Такие параметры оценить с помощью классических датчиков не представляется возможным, поэтому для их измерения будет применяться комбинированный подход, а именно применение классических датчиков для измерения состояния совместно с системой технического зрения. Поэтому в составе системы контроля качества будет использоваться: набор датчиков, измеряющих глубину и высоту выступания/углубления заклёпки в корпус; камера, для определения качества установки заклёпок, выявления трещин и деформаций заклёпок; система подсветки для камеры; контроллер для обработки и анализа видео с камеры, а также контроллер для обработки сигналов с датчиков и видео потока с камеры. В качестве контроллера для обработки сигналов и видео при разработке экспериментального образца роботизированного комплекса будет использоваться компактный микрокомпьютер семейства Nvidia Jetson [12], но могут быть использованы и другие компьютеры с достаточными вычислительными мощностями.

На основании приведённого анализа существующих локальных систем управления была разработана структура системы управления автоматизированной системы на базе роботизированного комплекса (рис. 4).

Экспериментальный образец автоматизированной системы будет строиться на базе робота Kuka KR60-3 для апробации и отработки алгоритмов работы системы управления [13]. При дальнейшем развитии для обработки более крупногабаритных изделий будут применяться более грузоподъёмные модели роботов.

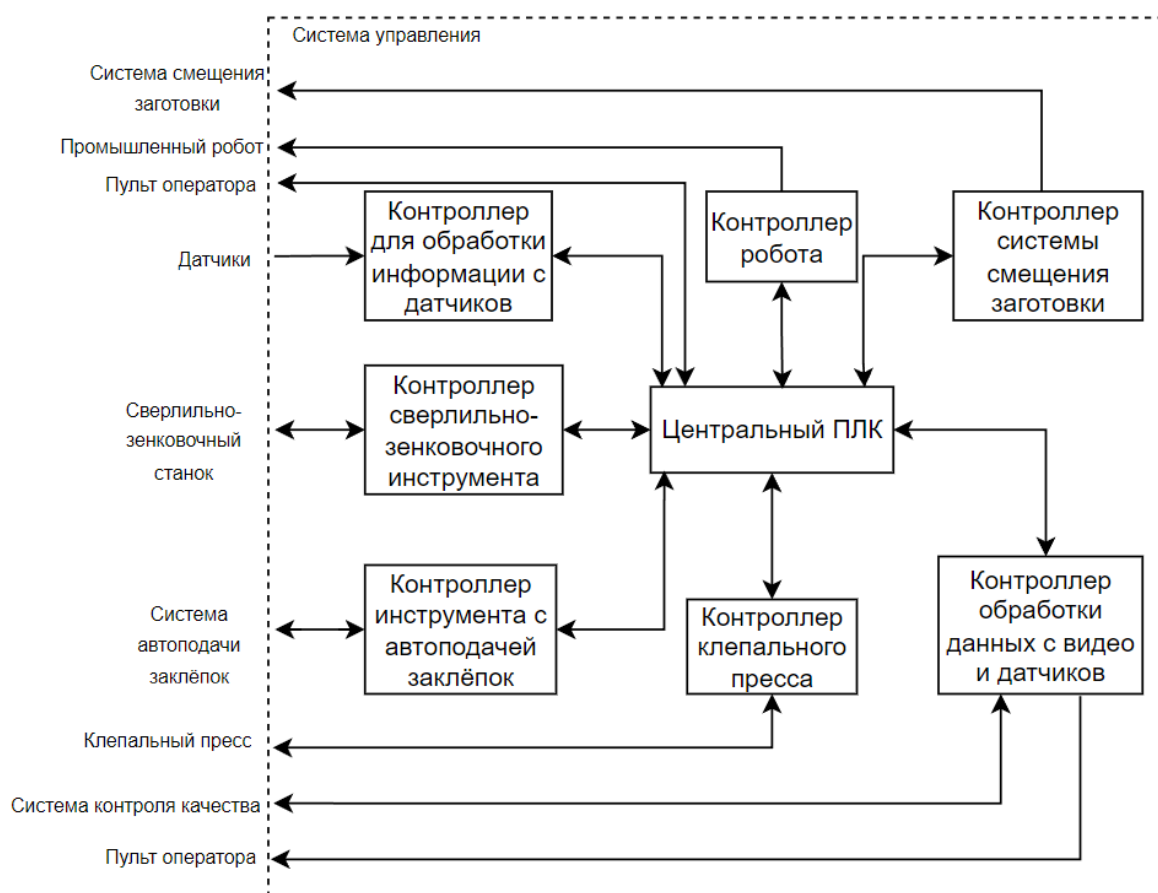


Рис. 4. Структура системы управления

Разработка алгоритмов:

На основе приведённых выше схем и назначения компонентов схемы были разработаны алгоритмы работы автоматизированной системы. При разработке алгоритмов учитывались передаваемые между элементами системы управления данные и сигналы, которые приведены ниже.

Передача данных между компонентами системы:

Пульт оператора передаёт:

На ЦПЛК:

- команда старта работы системы;
- команда экстренной остановки работы комплекса.

ЦПЛК передаёт:

На контроллер робота:

- команды запуска и остановки работы;
- команды на перемещение;
- параметры настройки работы робота (скорость, ускорение, номера баз, номера инструментов и т.д.);
- запросы данных о текущем состоянии и положении.

На контроллер системы смещения заготовки:

- команды запуска и остановки работы;
- координаты для перемещения;
- команды на смещение.

На контроллер сверлильно-зенковочного инструмента:

- команды запуска и остановки работы.
- параметры настройки (номер используемого сверла, номер используемого зенкера, глубина заглабления);
- команды сверления.

На контроллер инструмента с автоподачей заклёпок:

- команды запуска и остановки работы;
- параметры настройки (номер бункера, из которого берётся заклёпка);
- команды на установку заклёпок.

На контроллер клепального прессы:

- команды запуска и остановки работы;
- параметры настройки (сила сжатия);
- команды на разворот насадок;
- команды на смену насадок;
- команды сжатия прессы.

На контроллер обработки информации с датчиков:

- запросы данных.

На контроллер обработки данных с видео и датчиков:

- команды на запуск цикла измерения;
- параметры оцениваемых заклёпок.

На пульт оператора:

- сигнал об успешном/не успешном завершении работы комплекса;
- данные о текущем состоянии, процессе выполнения сборки;
- сигналы об успешном/не успешном выполнении отдельных операций;
- Коды соответствующих ошибок.

Всем:

- команды экстренной остановки работы оборудования.

Контроллер работа передаёт:

На ЦПЛК:

- сигналы об успешном/не успешном завершении перемещения;
- информация о текущем состоянии и координатах;
- сигналы о возникающих ошибках.

Контроллер системы смещения заготовки передаёт:

На ЦПЛК:

- сигналы об успешном/не успешном завершении операций;
- сигналы о возникающих ошибках.

Контроллер для обработки информации с датчиков передаёт:

На ЦПЛК:

- результаты оценки измерений с датчиков (параметры деформаций, перемещения и ускорения заготовок);
- сигналы о возникающих ошибках.

Контроллер сверлильно-зенковочного инструмента передаёт:

На ЦПЛК:

- сигнал об успешном/не успешном завершении работы инструмента;
- сигналы о возникающих ошибках.

Контроллер инструмента с автоподачей заклёпок передаёт:

На ЦПЛК:

- сигнал об успешном/не успешном завершении работы инструмента;

- сигналы о возникающих ошибках.

Контроллер клепального пресса передаёт:

На клепальный пресс:

- команды запуска и остановки работы;
- параметры настройки (сила сжатия);
- команды на разворот насадок;
- команды на смену насадок;
- команды сжатия и разжатия пресса.

На ЦПЛК:

- сигнал об успешном/не успешном завершении работы пресса;
- сигналы о возникающих ошибках.

Контроллер обработки данных с видео и датчиков передаёт:

На ЦПЛК:

- обработанные данные с камеры и датчиков системы контроля качества (общий вывод о допустимых/недопустимых пределах выступов/углублений заклёпок в корпус, набор статистической информации по каждой из проверяемых точек);

- сигналы о возникающих ошибках.

на пульт оператора:

- фотографии с камеры с указанием номера проверяемой заклепки и результатами проверки качества.

Для управления автоматизированной системой был разработан укрупнённый алгоритм работы ЦПЛК. Для удобства восприятия этот алгоритм был разделён на подпрограммы.

Подпрограмма, выполняемая при старте работы системы, держит автоматизированную систему в режиме ожидания, пока с пульта оператора не поступит команда запуска работы системы. Как только ЦПЛК получает от пульта оператора команду запуска, ЦПЛК инициализирует начало работы системы, осуществляет отправку на пульт оператора сигнала о старте работы системы, делает запрос данных у системы смещения заготовки о её положении и запрос данных у контроллера робота о положении робота. В случае успешного получения данных осуществляется обработка полученных данных и переход к основной подпрограмме. В случае отсутствия запрошенных данных от какого-либо из компонентов осуществляется переход к подпрограмме, отвечающей за обработку ошибок. Алгоритм работы подпрограммы обработки ошибок будет рассмотрен далее.

Основная программа алгоритма работы ЦПЛК начинается с проверки поступления сигнала паузы от оператора. Если такой сигнал поступил, то осуществляется ожидание в цикле, пока не поступит повторная команда запуска. Таким образом реализуется возможность безопасной приостановки процесса при его большой длительности (например, когда требуется обслуживание или смена инструментов). Далее выполняется чтение следующей команды управляющей программы процесса сборки (на первой итерации процесса следующей командой считается первая команда в управляющей программе сборки). Сама управляющая программа сборки при этом представляет собой файл, в котором построчно записаны команды перемещений робота в необходимые точки в пространстве, а также выполняемые между ними команды для взаимодействия с остальным оборудованием автоматизированной системы (сверление/зенковка, установка клепок, заклепывание, контроль качества). Прочитанная из файла команда поочерёдно подвергается проверкам на соответствие различным типам операций. При этом, в зависимости от распознанного типа команды, выполняется соответствующий фрагмент

алгоритма, осуществляющий выделение из текстовой строки с командой ее параметров и формирование структуры данных, необходимых и достаточных для выполнения данной команды (например – набор координат, настройки скорости и ускорения для команд перемещений).

Если команда относится к смещению оснастки с заготовкой, то подготовленные координаты для перемещения передаются на контроллер системы смещения заготовки, после чего ожидается сигнал об успешном завершении операции смещения заготовки. Если команда относится к перемещению робота, то вызывается подпрограмма управления перемещением робота, в которой подготовленный набор данных используется в качестве параметров. Если команда относится к сверлению или зенковке, то на контроллер сверлильно-зенковочного инструмента передаются: команда запуска операции сверления/зенковки, информация о номере используемого сверла/зенкера и глубине сверления/зенковки, после чего ожидается сигнал о завершении операции сверления/зенковки. Если команда относится к операции установки заклёпок, то на контроллер инструмента с автоподачей заклёпок передаются: команда запуска и информация о номере бункера, из которого берётся заклёпка, после этого ожидается сигнал об успешном завершении операции установки заклёпок. Если команда относится к клёпке, то на контроллер клепального прессы передаются: команда для запуска работы и информация о номере насадки, угле её поворота и силе сжатия, после чего ожидается сигнал об успешном завершении операции клёпки. Если команда относится к оценке качества установленных заклёпок, то на контроллер обработки данных с видео и датчиков передаются: сигнал на запуск и параметры оцениваемых заклёпок, после чего ожидается сигнал о завершении операции проверки качества. Если команда относится к окончанию работы системы, то всем контроллерам передаётся команда об остановке работы системы и на пульт оператора передаётся сигнал о завершении работы системы, после чего работа комплекса завершается. Иначе – осуществляется переход к подпрограмме обработки ошибок.

Во всех случаях после отправки соответствующих команд и параметров подчиненному оборудованию формируется сообщение для оператора с указанием текущей операции. Также для каждого типа операций устанавливается предельное время ожидания ответа о завершении операции. Ожидание таких ответов производится в отдельной подпрограмме (подпрограмма обработки ошибок), функционирующей по следующему алгоритму:

Подпрограмма ожидает заданное время. Следует отметить, что для некоторых ситуаций (например, чтение нераспознанной команды или отсутствие ответа от оборудования при запуске системы) время ожидания устанавливается равным нулю – в таких случаях дальнейшая обработка происходит сразу. В случае, если в течение работы таймера ожидания на ЦПЛК приходит сообщение об успешном завершении текущей операции, то работа таймера прерывается и происходит переход к части алгоритма, обрабатывающей полученные данные (при этом выполняется формирование сообщений для пульта оператора, выход из подпрограммы и возврат в начало основной программы к проверке поступления сигнала паузы). Если же за время ожидания ответный сигнал не получен (либо получен сигнал с кодом ошибки), то всем контроллерам отправляются команды об остановке, после чего определяется код полученной ошибки и отправляется соответствующее сообщение на пульт оператора.

Подпрограмма управления перемещением робота функционирует следующим образом: выполняет запрос данных у контроллера робота о положении робота. Если данные не получены, осуществляется переход на подпрограмму, отвечающую за

проверку ошибок, а в случае успешного получения данных выполняется проверка, в нужном ли положении находится робот для выполнения следующей операции. Если робот находится в заданном положении, то выполняется запрос данных у контроллера обработки информации с датчиков о деформации заготовки. Если же робот находится в не подходящем положении, то перед отправкой запроса осуществляется передача на контроллер робота координат для перемещения робота, после чего происходит ожидание ответного сигнала об успешном завершении операции перемещения (если за заданное время ответный сигнал не поступает, то осуществляется переход на подпрограмму обработки ошибок).

В случае, если за заданное время ответ от контроллера обработки информации с датчиков не был получен, также происходит переход в подпрограмму обработки ошибок. При успешном получении данных производится проверка, выявлены ли деформации заготовки. Если заготовка деформирована, то выполняется расчёт координат положения робота для компенсации деформаций и выполняется повтор вышеописанных действий, начиная с передачи контроллеру робота скорректированных координат на перемещение. Повторение происходит до тех пор, пока деформация не будет устранена и робот не будет находиться в нужном положении. После устранения деформаций осуществляется переход в основную подпрограмму.

Пульт оператора реализует функции интерфейса оператора ПЛК, отдельный алгоритм в рамках данной работы для него не предусматривается. По решению оператора процесс может быть поставлен на паузу для технического обслуживания оборудования (в данном случае должна генерироваться программа для безопасного вывода оснастки с заготовками из рабочей зоны инструмента, после чего можно провести обслуживание инструмента и вернуть робота на позицию, где он был остановлен).

Контроллер обработки данных с видео и датчиков (система контроля качества) выявляет дефекты, допущенные при сборке, и передаёт информацию о них на пульт оператора. К дефектам относятся: наличие трещин на заклёпках, неравномерность формы головки заклёпки, выступание головки заклёпки из корпуса или углубление головки заклёпки в корпус, не попадающие в диапазон допустимых. Дефекты распознаются при помощи анализа изображения с камеры, а также приспособления для контроля углубления/выступания заклёпок [14]. В случае выявления дефектов на ЦПЛК передаются данные о дефектах, а на пульт оператора передаются данные о заклёпках и изображения дефектных заклёпок. Алгоритмы для реализации многофакторной оценки параметров и обработки сигналов с камеры требуют дополнительной разработки и будут представлены в последующих работах.

Алгоритмы работы контроллера системы смещения заготовки были разработаны ранее и приведены в работе «автоматизированный модуль смещения оснастки относительно фланца промышленного робота-манипулятора» [15].

Для локальных систем управления готовым серийно выпускаемым оборудованием, используемым в составе разрабатываемой системы, используются штатные алгоритмы, поэтому в рамках данной работы они также не приводятся.

Заключение. В рамках работы был выполнен анализ особенностей конструкции дверей летательных аппаратов и анализ технологии сборки дверей самолётов. На основании приведенного анализа были сформулированы требования к разрабатываемой автоматизированной системе на базе роботизированного комплекса. Были проанализированы варианты закрепления набора заготовок на фланце робота и из двух представленных вариантов был выбран для дальнейшей реализации вариант с захватом рамы с заготовками за отдельную перекладину над поверхностью двери.

Для обеспечения доступа инструментов по всей площади заготовок в составе разрабатываемой автоматизированной системы предусмотрено использование, ранее предложенной системы смещения заготовок [15].

В соответствии со сформулированными требованиями и с учетом результатов анализа технологического процесса сборки дверей был определен состав оборудования автоматизированной системы и разработана ее структура, представленная в виде функциональной схемы.

Для предложенной автоматизированной системы была разработана система управления, представленная виде функциональной схемы и включающая набор локальных систем управления для отдельных устройств, центральный ПЛК в качестве системы управления верхнего уровня и систему оценки качества клепки, реализующую многофакторную оценку, включающую как классические датчики, так и применение системы технического зрения.

Для предложенной системы управления были определены основные направления и типы передаваемой управляющей информации между устройствами, а также разработан алгоритм работы ЦПЛК, обеспечивающий совместную работу разнородного оборудования и предусматривающий защиту от возможных возникающих ошибок и аварийных ситуаций.

Разработанная автоматизированная система на базе роботизированного комплекса в дальнейшем может быть использована при автоматизации процессов, требующих сборки деталей из листовых заготовок, в авиационной отрасли или на других предприятиях с подобными процессами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мозоляк, А. И. Технологические особенности процесса сборки отсека фюзеляжа пассажирского самолёта / А. И. Мозоляк, Р. И. Гусева // Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. – 2021. – С. 283-285.
2. Патент № 2548644 С1 Российская Федерация, МПК В64С 1/14, В60J 5/04. Дверь для самолета (варианты) и механизм навески двери : № 2014120319/11 : заявл. 21.05.2014 : опубл. 20.04.2015 / А. Ф. Гречишко, Н. С. Кабанов, В. Н. Тузиков, Т. С. Хафизов ; заявитель Открытое акционерное общество "Туполев" (ОАО "Туполев"). – EDN ZFGUTB.
3. Гусева, Р. И. Особенности технологии сборки планера самолёта: учебное пособие / Р. И. Гусева; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – 133 с.
4. Асташов, А. И. Специальные заклепки, применяемые в самолетостроении // А. И. Асташов, А. В. Ширин // Трибуна ученого. – 2020. – №6. – С. 37-41.
5. Сагдиев, Т. А. Система теоретико-множественного описания и классификации конструктивно - технологического членения конструкции планера самолета / Т. А. Сагдиев, Ш. Т. Сагдиев, Б. Н. Норкобилов // Universum: технические науки: [сайт]. – 2022. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13959> (дата обращения 02.09.2025).
6. Патент на полезную модель № 93318 U1 Российская Федерация, МПК В21J 15/36. Приспособление для клепки (варианты) : № 2008126797/22 : заявл. 03.07.2008 : опубл. 27.04.2010 / А. Г. Громашев, С. Л. Васильев, В. Ф. Громов, А. Ф. Макаров ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, Закрытое акционерное общество "Гражданские самолеты Сухого". – EDN JVUZEQ.
7. Антипов, В. В. Изучение влияния режимов клепки на малоцикловую усталость клепаных соединений листов, изготовленных из алюминий-литиевых сплавов / В. В. Антипов, М. В. Григорьев, А. Н. Коновалов, А. А. Мешков, Н. Ю. Серебренникова // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – №3. – С. 3-8.

8. Патент № 2555263 C1 Российская Федерация, МПК B21J 15/44, G05B 19/18. Способ клепки криволинейных панелей на сверлильно-клепальном автомате : № 2014100544/02 : заявл. 09.01.2014 : опубл. 10.07.2015 / П. Л. Людоговский, Н. С. Гайнуллин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). – EDN LZFPBA.
9. Кучеров, В. П. Основы технологии производства самолета Ил-114: учебное пособие / В.П. Кучеров. – Самара: Самарский университет, 2018 – 332 с.
10. Маданов, А. В. Анализ технологической подготовки производства авиационных деталей сложной геометрии на станках с числовым программным управлением / А. В. Маданов // Известия Самарского научного центра РАН – 2014 – С. 1467-1472.
11. Руководство по грузовым перевозкам Часть В Правила и Процедуры. – URL: https://www.aeroflot.ru/media/aflfiles/cargo/rossiya/Informaciya_po_tipam_VS_Rossiya_21.04.14.pdf (дата обращения 05.08.2025).
12. NVIDIA Jetson Nano: тесты и первые впечатления. – URL: <https://habr.com/ru/articles/460723/> (дата обращения: 11.11.2024).
13. Роботы KUKA средней грузоподъемности. – URL: <https://www.rudetrans.ru/upload/iblock/e0e/sredney-gruzopodemnosti.pdf?ysclid=mga24tw18t308531675> (дата обращения 05.08.2025).
14. Худайберганов, А. П. Справочник молодого слесаря-сборщика летательных аппаратов / А. П. Худайберганов, А. Я. Черняк, А. С. Лозинский. – Москва: Машиностроение, 1987. – 88 с.
15. Григорев, Р. Д. Автоматизированный модуль смещения оснастки относительно фланца промышленного робота-манипулятора / Р. Д. Григорев, С. И. Сухоруков, А. С. Гудим // Автоматизация в промышленности. – 2025. – №1. – С. 46-50.

REFERENCES LIST

1. Mozoliak, A. I. Tekhnologicheskie osobennosti protsessa sborki otseka fiuzeliazha passazhirskogo samoleta / A. I. Mozoliak, R. I. Guseva // Materialy IV Vserossiiskoi natsionalnoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Molodezh i nauka: aktualnye problemy fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy. – 2021. – S. 283-285.
2. Patent № 2548644 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK B64C 1/14, B60J 5/04. Dver dlia samoleta (varianty) i mekhanizm naveski dveri : № 2014120319/11 : zaiavl. 21.05.2014 : opubl. 20.04.2015 / A. F. Grechishko, N. S. Kabanov, V. N. Tuzikov, T. S. Khafizov ; zaiavitel Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo Tupolev (OAO Tupolev). – EDN ZFGUTB.
3. Guseva, R. I. Osobennosti tekhnologii sborki planera samoleta: uchebnoe posobie / R. I. Guseva; Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professionalnogo obrazovanie Komsomolskii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet – Komsomolsk-na-Amure: FGBOU VPO «KnAGTU», 2013. – 133 s.
4. Astashov, A. I. Spetsialnye zaklepki, primeniaemye v samoletostroenii // A. I. Astashov, A. V. Shirin // Tribuna uchenogo. – 2020. – №6. – S. 37-41.
5. Sagdiev, T. A. Sistema teoretiko-mnozhestvennogo opisaniia i klassifikatsii konstruktivno - tekhnologicheskogo chleneniia konstruksii planera samoleta / T. A. Sagdiev, Sh. T. Sagdiev, B. N. Norkobilov // Universum: tekhnicheskie nauki: [sait]. – 2022. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13959> (data obrashcheniia 02.09.2025).
6. Patent na poleznuiu model № 93318 U1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK B21J 15/36. Prispособlenie dlia kleпки (varianty) : № 2008126797/22 : zaiavl. 03.07.2008 : opubl. 27.04.2010 / A. G. Gromashev, S. L. Vasilev, V. F. Gromov, A. F. Makarov ; zaiavitel Rossiiskaia Federatsiia, ot imeni kotoroi vystupaet Ministerstvo promyshlennosti i trgovli Rossiiskoi Federatsii, Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo Grazhdanskie samolety Sukhogo. – EDN JVUZEQ.
7. Antipov, V. V. Izuchenie vliianiia rezhimov kleпки na malotsiklovuiu ustalost klepanykh soedinenii listov, izgotovlennykh iz aliuminii-litievyykh splavov / V. V. Antipov, M. V. Grigorev, A. N. Kononov, A. A. Meshkov, N. Iu. Serebrennikova // Aviatsonnye materialy i tekhnologii. – 2019. – №3. – S. 3-8.
8. Patent № 2555263 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK B21J 15/44, G05B 19/18. Sposob kleпки krivolineynykh panelei na sverlilno-klepalnom avtomate : № 2014100544/02 : zaiavl. 09.01.2014 : opubl. 10.07.2015 / P. L. Liudogovskii, N. S. Gainullin ; zaiavitel Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professionalnogo obrazovaniia Kazanskii natsionalnyi issledovatel'skii tekhnicheskii universitet im. A.N. Tupoleva-KAI (KINITU-KAI). – EDN LZFPBA.

9. Kuchеров, V. P. Osnovy tekhnologii proizvodstva samoleta Il-114: uchebnoe posobie / V.P. Kuchеров. – Samara: Samarskii universitet, 2018 – 332 s.
10. Madanov, A. V. Analiz tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva aviatsionnykh detalei slozhnoi geometrii na stankakh s chislovym programmnyim upravleniem / A. V. Madanov // Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN – 2014 – S. 1467-1472.
11. Rukovodstvo po gruzovym perevozкам Chast V Pravila i Protsedury. – URL: https://www.aeroflot.ru/media/aflfiles/cargo/rossiya/Informaciya_po_tipam_VS_Rossiya_21.04.14.pdf (data obrashcheniia 05.08.2025).
12. NVIDIA Jetson Nano: testy i pervye vpechatleniia. – URL: <https://habr.com/ru/articles/460723/> (data obrashcheniia: 11.11.2024).
13. Roboty KUKA srednei gruzopodiemnosti. – URL: <https://www.rudetrans.ru/upload/iblock/e0e/sredney-gruzopodemnosti.pdf?ysclid=mga24tw18t308531675> (data obrashcheniia 05.08.2025).
14. Khudaiberganov, A. P. Spravochnik mladogo slesaria-sborshchika letatelnykh apparatov / A. P. Khudaiberganov, A. Ia. Cherniak, A. S. Lozinskii. – Moskva: Mashinostroenie, 1987. – 88 s.
15. Grigorets, R. D. Avtomatizirovannyi modul smeshcheniia osnastki otnositelno flantsa promyshlennogo robota-manipuliatora / R. D. Grigorets, S. I. Sukhorukov, A. S. Gudim // Avtomatizatsiia v promyshlennosti. – 2025. – №1. – S. 46-50.

Поступила в редакцию 13.03.2026 г., рекомендована к изданию 06.04.2026 г

AUTOMATION OF ASSEMBLY OF AIRCRAFT DOORS USING A ROBOTIC COMPLEX

Nedodko A.O., Sukhorukov S.I.

This work is aimed at developing an automated system for assembling aircraft doors based on a robotic complex that will take into account the design features of doors and enable their automated assembly, including performing intermediate quality control operations. The paper analyzes the door assembly technology; the options for securing a set of workpieces for their movement are analyzed.; The structure of an automated system is proposed, including an industrial robot manipulator for moving the door relative to the assembly equipment; the structure of the control system is developed, the methods of information interaction between the elements of the system are determined, and algorithms for the operation of the control system are developed. The proposed system will automate the process of assembling aircraft doors, which will ensure the stability of quality and productivity of their assembly.

Keywords: automated system, robotic complex, aircraft, aircraft door assembly, frame for blanks, system operation algorithms, billet displacement system.

Недоедко Александр Олегович

аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»,
Российская Федерация, Хабаровский край,
г. Комсомольск-на-Амуре.
E-mail: nedodko@bk.ru

Nedodko Aleksandr Olegovich

Postgraduate student at Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations of Komsomolsk-na-Amure State University,
Russian Federation, Khabarovsk Territory,
Komsomolsk-na-Amure.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7609-7317>

Сухоруков Сергей Иванович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»,
Российская Федерация, Хабаровский край,
г. Комсомольск-на-Амуре.
E-mail: sukhorukov@knastu.ru

Sukhorukov Sergei Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations of Komsomolsk-na-Amure State University,
Russian Federation, Khabarovsk Territory,
Komsomolsk-na-Amure.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1522-3517>

МОДУЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ СВЕТОФОРНЫМИ ФАЗАМИ ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПЕРЕКРЁСТКАХ

© 2026 Стрижко М.А., Червинский В.В.

В статье предложен модуль автоматического управления дополнительными светофорными фазами для интеллектуальной системы регулирования транспортных потоков на перекрестках на основе методов нечётких множеств. Разработка позволяет применять интеллектуальное управление автотрафиком на светофорных объектах со сложными схемами регулирования, имеющими три и более светофорные фазы в течение цикла, с целью снижения задержек и очередей автомобилей на перекрёстках. Описана концепция и детали реализации предложенных решений. Эффективность разработки подтверждена модельным экспериментом, в результате которого установлено, что использование модуля позволяет повысить качество управления на 41 % по сравнению с фиксированным управлением с дополнительными фазами и на 25 % по сравнению с интеллектуальным управлением без дополнительных фаз.

Ключевые слова: система автоматического управления, интеллектуальное управление, транспортный поток, светофорное регулирование, нечёткая логика.

Введение. Проблема заторов автомобильного транспорта в крупных городах на сегодняшний день ощущается достаточно остро и продолжает усугубляться, в связи с чем актуальны задачи повышения пропускной способности улично-дорожной сети и оптимизации дорожного регулирования. Так как возможности реконструкции и расширения городских улиц часто ограничены плотной застройкой, использование современных адаптивных, в том числе интеллектуальных, методов управления для регулирования транспортных потоков является одним из основных способов решения данной проблемы.

В последние десятилетия вопрос интеллектуального дорожного регулирования изучается многими отечественными и зарубежными авторами, а наибольшее число модификаций получили системы управления светофорными объектами на основе нейронных сетей [1–3] и нечёткой логики [4–6]. В работе [7] предложена интеллектуальная система управления автотранспортными потоками на регулируемых перекрёстках на основе нечёткой логики, особенность которой заключается в том, что переключение сигналов светофоров происходит без привязки ко времени горения сигнала, а на основании оценки необходимости смены фазы регулирования в текущий момент времени. Трафик, прибывающий на перекресток в каждом направлении, фиксируется при помощи детекторов транспорта, и путём нечеткого логического вывода принимается решение о том, есть ли необходимость в переключении сигнала светофора в данный момент или нет (с учётом ограничений минимальной и максимальной длительностей фазы регулирования согласно рекомендациям по организации дорожного движения [8]). Такой подход позволяет сделать процесс дорожного регулирования максимально похожим на работу человека – регулировщика, действия которого в данном случае принимаются эталоном адаптивного управления. Кроме того, использование технических средств позволяет расширить возможности системы по сравнению с

Работа выполнена в рамках молодёжной научной лаборатории «Искусственный интеллект» (Код НИОКТР FRFR-2024-0010).

«ручным» управлением за счёт увеличения предела видимости прибывающих на перекрёсток автомобилей и снижения времени реакции на изменение дорожной обстановки.

Однако, описанная система предназначена только для управления перекрёстками с двумя фазами регулирования с поочерёдным пропуском транспортных потоков в условных направлениях «север-юг» и «запад-восток». В то же время широко распространены и другие схемы управления трафиком с тремя и более фазами. В таких случаях в цикле регулирования выделяется отдельная фаза для выполнения автомобилями левого поворота с запретом движения для встречных потоков. Причём схемы разъезда транспорта в течение дополнительной фазы различаются для дорог с одной полосой движения в каждом направлении и с двумя и более полосами. Они приведены на рисунке 1.

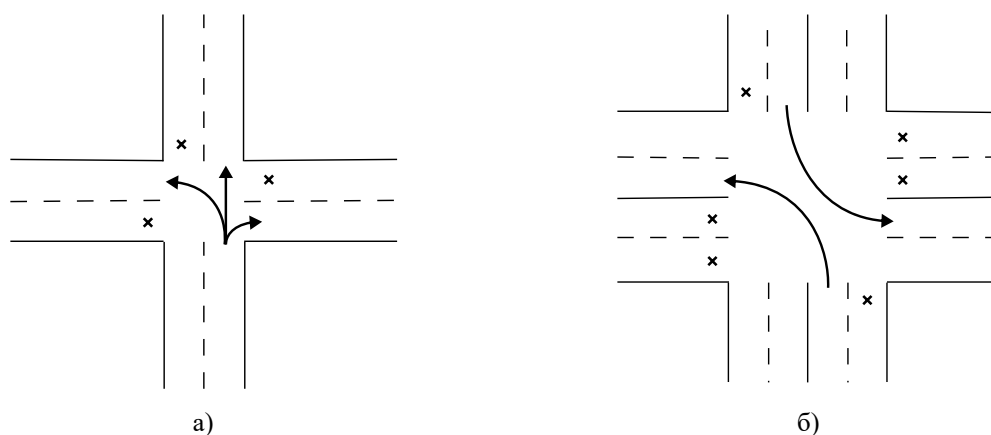


Рис. 1. Схемы разъезда транспорта во время фазы регулирования, обеспечивающей безопасный левый поворот: а) на дорогах с одной полосой движения в одном направлении; б) на дорогах с двумя и более полосами движения в одном направлении

В связи с вышеизложенным возникает необходимость модификации описанной системы управления транспортными потоками для применения на перекрёстках с более сложными схемами регулирования при трёх и более светофорных фазах в одном цикле. Алгоритм управления в таком случае предполагает принятие двух решений:

- о необходимости включения дополнительной фазы регулирования в текущем цикле (так как в определённых ситуациях её использование может быть нецелесообразным и приводить к увеличению задержек в других направлениях);
- о длительности дополнительной фазы регулирования (выборе момента завершения фазы) при её наличии в текущем цикле.

Модификация исходной системы управления трафиком с двумя фазами регулирования возможна путём введения дополнительного модуля, позволяющего оценить необходимость включения третьей фазы в текущем цикле. В основе работы модуля используются методы нечётких множеств.

Управление дополнительными светофорными фазами на дорогах с одной полосой движения в одном направлении. Для данного случая реализация модуля управления следующая. При помощи детекторов транспорта отслеживаются потоки автомобилей, движение которых в данный момент разрешено, с разделением по встречным направлениям (например, север-юг и юг-север). Количество автомобилей в очереди по каждому встречному направлению поступает на входы дополнительного модуля и фазифицируется тремя термами: «Мало машин», «Средне машин», «Много машин». На выходе модуля формируется сигнал, характеризующий необходимость

включения третьей фазы регулирования в текущий момент времени (Н). Этот сигнал фазифицируется тремя термами: «Третья фаза необходима в направлении север-юг» (фСЮ), «Третья фаза необходима в направлении юг-север» (фЮС), «Нет необходимости в третьей фазе» (фО). Взаимосвязь входов и выходов дополнительного модуля управления представлена на рисунке 2.

Кол-во автомобилей в очереди:

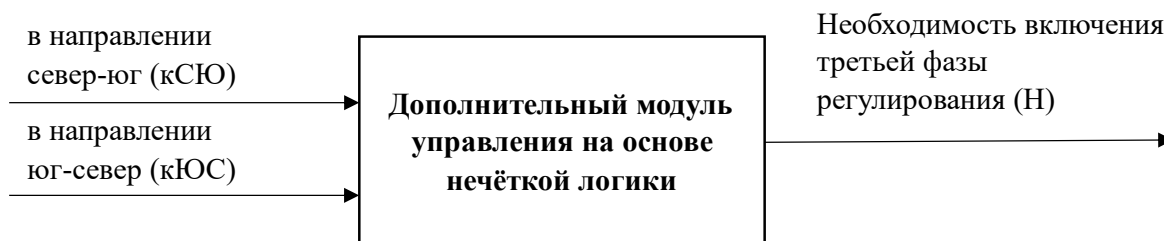


Рис. 2. Взаимосвязь входов и выходов дополнительного модуля управления для включения фазы безопасного левого поворота на дороге с одной полосой движения в одном направлении

Функции принадлежности нечетких переменных дополнительного модуля управления представлены на рисунке 3.

Выходная переменная в результате дефазификации принимает значения в диапазоне от -1 до 1 , на основе которых системой принимается решение о включении в текущем цикле дополнительной фазы регулирования для безопасного левого поворота. Если значение выходной переменной лежит в диапазоне от -1 до $-0,3$, значит, дополнительную фазу необходимо включить в направлении север-юг; если в диапазоне от $-0,3$ до $0,3$ – нет необходимости в дополнительной фазе; если в диапазоне от $0,3$ до 1 – дополнительную фазу необходимо включить в направлении юг-север.

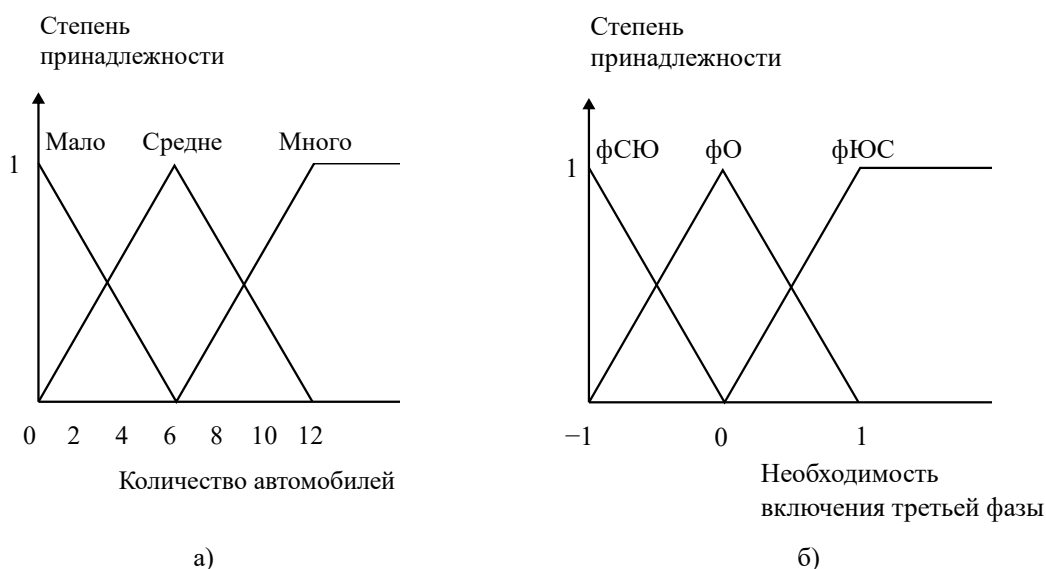


Рис. 3. Функции принадлежности нечетких переменных дополнительного модуля управления на дороге с одной полосой движения в одном направлении: а) для входных переменных; б) для выходной переменной

Нечёткие правила, на основе которых производится логический вывод дополнительного модуля управления, следующие:

ЕСЛИ кЮС = Мало И кСЮ = Мало ТО Н = фО;
ЕСЛИ кЮС = Мало И кСЮ = Средне ТО Н = фСЮ;

ЕСЛИ кЮС = Мало	И кСЮ = Много	ТО Н = фСЮ;
ЕСЛИ кЮС = Средне	И кСЮ = Мало	ТО Н = фЮС;
ЕСЛИ кЮС = Средне	И кСЮ = Средне	ТО Н = фО;
ЕСЛИ кЮС = Средне	И кСЮ = Много	ТО Н = фСЮ;
ЕСЛИ кЮС = Много	И кСЮ = Мало	ТО Н = фЮС;
ЕСЛИ кЮС = Много	И кСЮ = Средне	ТО Н = фЮС;
ЕСЛИ кЮС = Много	И кСЮ = Много	ТО Н = фО.

Оценка ситуации на перекрёстке на предмет необходимости включения третьей фазы регулирования осуществляется дополнительным модулем управления параллельно с оценкой ситуации на предмет смены основной фазы в пользу конфликтующих (перпендикулярных текущему) направлений основной системой. Если условия для смены фазы в пользу конфликтующих (перпендикулярных текущему) направлений возникли раньше, значит, дополнительная фаза для безопасного левого поворота не включается в текущем цикле. Если же раньше возникли условия для включения третьей фазы регулирования, то она включается для соответствующего направления и продолжается до тех пор, пока не произойдёт переключение основной фазы в пользу конфликтующих (перпендикулярных текущему) направлений основной системой. Кроме этого, для каждой фазы регулирования, если она была включена, устанавливается минимальная и максимальная допустимая длительность согласно рекомендациям по организации дорожного движения.

Управление дополнительными светофорными фазами на дорогах с двумя и более полосами движения в одном направлении. Схема движения автомобилей во время третьей фазы в данном случае отличается тем, что левый поворот могут одновременно выполнять транспортные средства, движущиеся по левым полосам во встречных направлениях, разъезжаясь правым бортом, а движение прямо как по левым, так и по остальным полосам должно быть ограничено.

Для реализации такой схемы на первый вход дополнительного модуля управления поступает информация о количестве машин в очереди по левым полосам обоих встречных направлений, причём выбирается длина бóльшей из очередей (кЛ). На второй вход модуля поступает информация о длине наибольшей очереди по остальным полосам обоих встречных направлений (кО). Выходная переменная характеризует необходимость включения третьей фазы регулирования для выполнения левого поворота (Н). Взаимосвязь входов и выходов дополнительного модуля управления для дорог с двумя и более полосами движения в одном направлении представлена на рисунке 4.

Наибольшая длина очереди
по полосам обоих направлений:

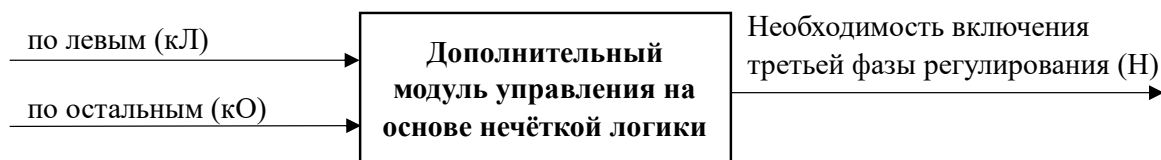


Рис. 4. Взаимосвязь входов и выходов дополнительного модуля управления для включения фазы безопасного левого поворота на дороге с двумя и более полосами движения в одном направлении

Входные переменные модуля управления фазифицируются тремя термами: «Мало машин», «Средне машин», «Много машин». Их функции принадлежности аналогичны функциям модуля управления для дорог с одной полосой движения в одном направлении, представленным на рисунке 3а. Выходная переменная модуля –

необходимость включения третьей фазы регулирования – фазифицирована тремя термами: «Низкая», «Средняя» и «Высокая». Её функции принадлежности представлены на рисунке 5. При значениях выходной переменной в диапазоне от 0 до 0,5 системой принимается решение о продолжении текущей основной фазы регулирования. При значениях в диапазоне 0,5 до 1 включается третья фаза.

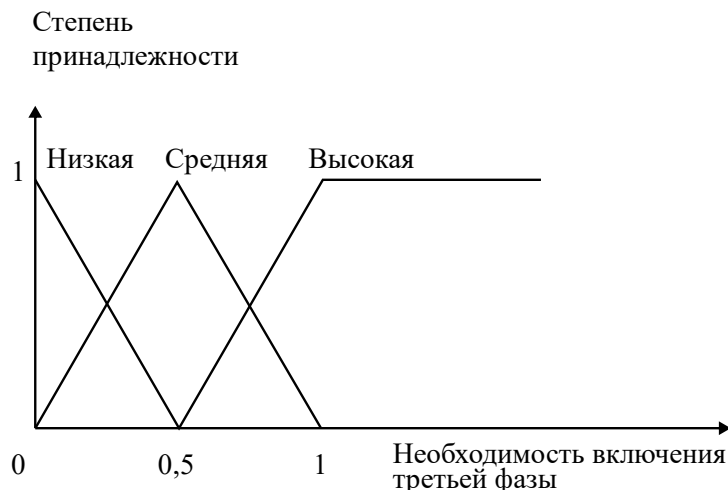


Рис. 5. Функции принадлежности выходной нечеткой переменной дополнительного модуля управления на дороге с двумя и более полосами движения в одном направлении

Нечёткие правила модуля управления для дорог с двумя и более полосами движения в одном направлении следующие:

ЕСЛИ кО = Мало	И кЛ = Мало	ТО Н = Низкая;
ЕСЛИ кО = Мало	И кЛ = Средне	ТО Н = Высокая;
ЕСЛИ кО = Мало	И кЛ = Много	ТО Н = Высокая;
ЕСЛИ кО = Средне	И кЛ = Мало	ТО Н = Низкая;
ЕСЛИ кО = Средне	И кЛ = Средне	ТО Н = Средняя;
ЕСЛИ кО = Средне	И кЛ = Много	ТО Н = Средняя;
ЕСЛИ кО = Много	И кЛ = Мало	ТО Н = Низкая;
ЕСЛИ кО = Много	И кЛ = Средне	ТО Н = Низкая;
ЕСЛИ кО = Много	И кЛ = Много	ТО Н = Средняя.

Как и для дорог с одной полосой движения в одном направлении, в этом случае дополнительный модуль управления работает параллельно с основной системой, оценивая необходимость включения третьей фазы в том направлении, для которого движение в данный момент разрешено. Данная фаза может быть включена или пропущена в текущем цикле в зависимости от дорожной обстановки. Завершается третья фаза при переключении основной фазы в пользу конфликтующих направлений (перпендикулярных текущему) основной системой.

Моделирование и оценка качества управления. Оценка эффективности интеллектуального управления транспортными потоками на перекрёстках с использованием предложенного дополнительного модуля проведена при помощи компьютерного моделирования автотрафика на улично-дорожной сети. Данные о параметрах прибывающих на перекрёстки транспортных потоков получены в ходе исследования светофорных объектов города Донецка, которое описано в [9]. Модельный эксперимент проведен при различных режимах управления:

1. Фиксированное управление с дополнительными фазами, действующее на перекрёстках города на момент проведения эксперимента.

2. Интеллектуальное управление с двумя основными фазами, реализуемое исходной системой управления.

3. Интеллектуальное управление с дополнительными фазами, реализуемое с применением предложенного модуля управления.

Качество управления оценивается по двум показателям:

- среднее время ожидания на перекрёстке;
- средняя длина очереди автомобилей.

Результаты эксперимента следующие: применение интеллектуальной системы управления транспортными потоками с двумя основными фазами позволило сократить среднее время ожидания на 16 % и среднюю длину очереди на 16 % по сравнению с фиксированным регулированием с дополнительными фазами, действующим на исследуемых перекрёстках на момент проведения эксперимента. Использование модуля интеллектуального управления для включения дополнительных фаз улучшило оба показателя качества на 41 % по сравнению с фиксированным регулированием с дополнительными фазами. Улучшение качества управления по сравнению с исходной интеллектуальной системой управления составило 25 %. Сравнительные гистограммы полученных данных приведены на рисунке 6.

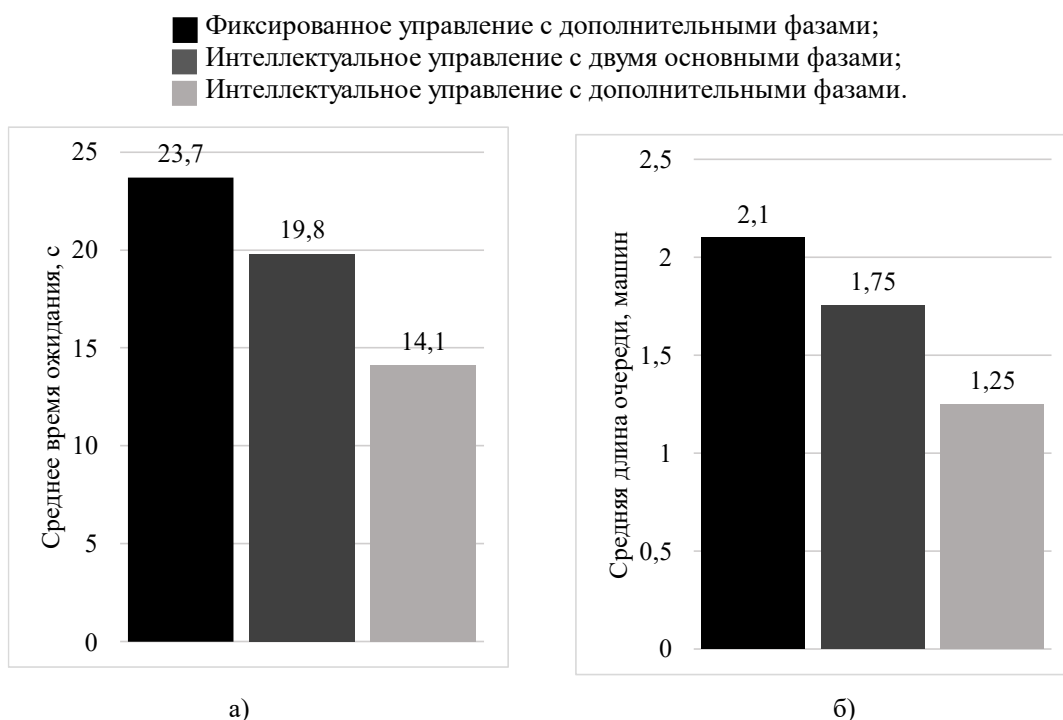


Рис. 6. Результаты сравнения систем управления транспортными потоками:
а) по среднему времени ожидания; б) по средней длине очереди

Выводы. Разработан модуль управления дополнительными фазами светофорного регулирования для интеллектуальной системы управления автотранспортными потоками на регулируемых перекрёстках для дорог с одной полосой движения в одном направлении и дорог с двумя и более полосами движения в одном направлении. Принцип работы модуля основан на методах нечётких множеств и позволяет оценивать необходимость включения фазы регулирования для выполнения безопасного левого поворота в текущем цикле, а также длительность этой фазы, если она была включена.

Проведено модельное исследование предложенных решений, в результате которого установлено, что дополнительный модуль управления позволяет улучшить

качество регулирования транспортных потоков на 41 % по сравнению с фиксированным управлением с дополнительными светофорными фазами и на 25 % по сравнению с интеллектуальным управлением с двумя основными фазами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Казарян, Д. Э. Нейросетевые подходы к управлению потоками транспорта / Д. Э. Казарян, В. А. Михалев, Е. А. Софронова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 97–106.
2. Нейросетевая технология анализа транспортных потоков в автоматизированных системах управления дорожным движением / Р. М. Хусаинов, Н. Г. Талипов, А. С. Катасев, Д. В. Шалаева // Программная инженерия. – 2023. – Т. 14, № 10. – С. 513–519.
3. Mondal, M. A. Intelligent Traffic Congestion Classification System Using Artificial Neural Network / M. A. Mondal, Z. Rehena // Companion Proceedings of the World Wide Web conference. – 2019. – P. 110–116.
4. Ali, M. E. M. An Adaptive Method for Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic with Webster and Modified Webster Formula Using SUMO Traffic Simulator / M. E. M. Ali, A. Durdu, S. A. Celtek, A. Yilmaz // IEEE Access. – 2021. – P. 1138–1145.
5. Azarshab, M. An Intelligent Fuzzy Logic Based Traffic Controller / M. Azarshab, M. Ghazanfari, F. Heidarpour // SRPH Journal of Fundamental Sciences and Technology. – 2021. – No. 3 (1). – P. 10–17.
6. Mahmood, T. A Two-Stage Fuzzy Logic Adaptive Traffic Signal Control for an Isolated Intersection Based on Real Data Using SUMO Simulator / T. Mahmood, M. E. M. Ali, A. Durdu // Electron. Commun. Eng. – 2019. – Vol. 3, P. 656–659.
7. Стрижко, М. А. Система интеллектуального управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием / М. А. Стрижко, В. В. Червинский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 48–55. – DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.008. – EDN OCZYOS.
8. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых пересечениях. – М. : Минтранс РФ, 2017. – 91 с.
9. Стрижко, М. А. Исследование суточной неравномерности транспортного потока в городе Донецке / М. А. Стрижко, В. В. Червинский // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2023 : Материалы IX Международной научно-практической конференции (заочно-дистанционная) в рамках 9-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие», Горловка, 25 мая 2023 года. – Горловка: Автомобильно-дорожный институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донецкий национальный технический университет» в г. Горловка, 2023. – С. 310–313. – EDN SMMDEI.

REFERENCES LIST

1. Kazarian, D. E. Neurosetevye podkhody k upravleniiu potokami transporta / D. E. Kazarian, V. A. Mikhalev, E. A. Sofronova // Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniia. – 2017. – T. 18, № 1. – S. 97–106.
2. Neurosetevaia tekhnologiia analiza transportnykh potokov v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniia dorozhnym dvizheniem / R. M. Khusainov, N. G. Talipov, A. S. Katasev, D. V. Shalaeva // Programmaia inzheneriia. – 2023. – T. 14, № 10. – S. 513–519.
3. Mondal, M. A. Intelligent Traffic Congestion Classification System Using Artificial Neural Network / M. A. Mondal, Z. Rehena // Companion Proceedings of the World Wide Web conference. – 2019. – P. 110–116.
4. Ali, M. E. M. An Adaptive Method for Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic with Webster and Modified Webster Formula Using SUMO Traffic Simulator / M. E. M. Ali, A. Durdu, S. A. Celtek, A. Yilmaz // IEEE Access. – 2021. – P. 1138–1145.
5. Azarshab, M. An Intelligent Fuzzy Logic Based Traffic Controller / M. Azarshab, M. Ghazanfari, F. Heidarpour // SRPH Journal of Fundamental Sciences and Technology. – 2021. – No. 3 (1). – P. 10–17.
6. Mahmood, T. A Two-Stage Fuzzy Logic Adaptive Traffic Signal Control for an Isolated Intersection Based on Real Data Using SUMO Simulator / T. Mahmood, M. E. M. Ali, A. Durdu // Electron. Commun. Eng. – 2019. – Vol. 3, P. 656–659.

7. Strizhko, M. A. Sistema intellektualnogo upravleniia transportnymi potokami na perekrestkakh so svetofornym regulirovaniem / M. A. Strizhko, V. V. Chervinskii // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – T. 20, № 2. – S. 48-55. – DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.008. – EDN OCZYOS.
8. Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke i realizatsii meropriatii po organizatsii dorozhnogo dvizheniia. Organizatsiia dorozhnogo dvizheniia na reguliruemymkh peresecheniiakh. – M. : Mintrans RF, 2017. – 91 s.
9. Strizhko, M. A. Issledovanie sutochnoi neravnomernosti transportnogo potoka v gorode Donetske / M. A. Strizhko, V. V. Chervinskii // Nauchno-tekhnicheskie aspekty razvitiia avtotransportnogo kompleksa 2023 : Materialy IKh Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (zaочно-distantionnaia) v ramkakh 9-go Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma Donetskoï Narodnoï Respubliki «Innovatsionnye perspektivy Donbassa: infrastrukturnoe i sotsialno-ekonomicheskoe razvitie», Gorlovka, 25 maia 2023 goda. – Gorlovka: Avtomobilno-dorozhnyi institut (filial) Federalnogo gosudarstvennogo biudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniia vysshego obrazovaniia «Donetskii natsionalnyi tekhnicheskii universitet» v g. Gorlovka, 2023. – S. 310-313. – EDN SMMDEI.

Поступила в редакцию 19.03.2026 г., рекомендована к изданию 09.04.2026 г.

AUTOMATIC CONTROL MODULE FOR ADDITIONAL TRAFFIC LIGHT PHASES FOR INTELLIGENT REGULATION OF TRAFFIC FLOWS AT INTERSECTIONS

Strizhko M.A., Chervinskii V.V.

The article proposes an automatic control module for additional traffic light phases for an intelligent traffic flows regulation system at intersections based on fuzzy set methods. The technology makes it possible to apply intelligent traffic control at traffic light facilities with complex control schemes having three or more traffic light phases during the cycle, in order to reduce delays and queues of cars at intersections. The concept and details of the implementation of the proposed solutions are described. The effectiveness of the development was confirmed by a model experiment, as a result of which it was found that using the module can improve the quality of control by 41% compared to fixed control with additional phases and by 25% compared to intelligent control without additional phases.

Keywords: automatic control system, intelligent control, traffic flow, traffic light regulation, fuzzy logic.

Стрижко Михаил Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: strizhko.mihail@yandex.ru

Strizhko Mikhail Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2702-5194>

Червинский Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: tscherwi@mail.ru

Chervinskii Vladimir Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8219-4889>

АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТИ LLM05 (НЕКОРРЕКТНАЯ ОБРАБОТКА ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ)© 2026 *Бабичева М.В.*

В настоящей работе представлена атака типа непрямая промпт-инъекция с генерацией небезопасного вывода и эксплуатация на целевом хосте. На экспериментальном стенде с LLM-агентом демонстрируются сквозные атаки, приводящие к XSS и SQL-инъекции с использованием уязвимости LLM05. Исследуются причины возникновения уязвимости и методы защиты.

Ключевые слова: LLM-агент, LLM05, XSS-атака, SQL-инъекция, вайбкодинг.

Введение. При использовании гибридных систем, интегрирующих генеративные модели с внешними инструментами (API, файловые системы, веб-интерфейсы), проблема некорректной обработки выходных данных (Improper Output Handling, OWASP LLM05) выходит за рамки простой санации ввода. В отличие от традиционных веб-приложений, где источником вредоносного кода является пользователь, в LLM-агентных архитектурах генерация опасных строк делегируется самой модели. Это порождает принципиально новый класс уязвимостей, где LLM выступает непосредственным источником зловредного контента [1, 2].

Постановка задачи и методика эксперимента. Поскольку проблема вайбкодинга, когда программист делегирует свою работу искусственному интеллекту является актуальной для многих компаний, представим следующий сценарий.

В небольшой IT-компании разработчик получил задание разработать автоматизированного помощника для отдела кадров. Помощник должен принимать резюме в формате .docx и автоматически формировать красивые HTML-страницы, карточки кандидата, чтобы рекрутеры могли быстро просматривать их в браузере. В принципе это несложная задача, но кто же в настоящее время пишет код вручную? Для разработки приложения программист пользуется LLM-агентом, который распаковывает .docx, читает текст, затем через промпт «Извлеки текст из doc.docx. На основе этого текста сформируй HTML-страницу и сохрани её в файл html» отдаёт результат в веб-приложение. Фрагмент кода для AI агента представлен на рисунке 1.

Для экспериментального исследования был разработан собственный локальный LLM-агент на базе бесплатной модели gemma3:4b с использованием фреймворка smolagents. Агент обладает несколькими инструментами, с том числе: извлечение текста из .docx, сохранение HTML-строк в файл, запуск файла на локальном сервере Flask. Тестовый стенд представляет из себя изолированную среду, на ОС Windows 11. LLM запущена локально через Ollama без доступа к интернету, http сервер Flask также запущен локально, карточки кандидатов появляются как новые html файлы в браузере Yandex с включённым JavaScript.

Допустим, компания опубликовала вакансию «Senior Developer». Среди откликов пришло резюме от «Ивана Петрова». Внешний вид docx файла представлен на рисунке 2. Программист запускает агента с промптом, автоматически формируется html файл, который отдается серверу и рендерится в браузере. Однако кроме карточки мы видим alert, который является признаком XSS уязвимости. Это показано на рисунке 3.

```
model = LiteLLMModel(
    model_id="ollama/gemma3:4b",
    api_base="http://localhost:11434",
    temperature=0.0
)

agent = CodeAgent(
    tools=[
        ExtractImagesTool(),
        ExtractTextFromDocxTool(),
        SaveHTMLTool(),
        DuckDuckGoSearchTool()
    ],
    model=model,
    additional_authorized_imports=["pathlib", "zipfile", "os", "xml.etree."
)

if __name__ == "__main__":
    print("Агент готов. Введите запрос ('exit' для выхода).")
    while True:
        user_input = input("> ").strip()
        if user_input.lower() in ["exit", "quit", "выход"]:
            print("До свидания!")
            break
        if not user_input:
            continue
        response = agent.run(user_input)
        print("\nОтвет агента:\n", response)
        print()
```

Рис. 1. Фрагмент кода AI агента

ИВАН ПЕТРОВ
Full-stack разработчик
+7 (999) 123-45-67 | ivan.petrov@example.com | [github.com/ivanp](#)

Образование
2020 – 2024: Донгу, кафедра вейкбординга (бакалавр).

Опыт работы
2023 – н. в.: ООО «Техно системы», разработчик React / FastAPI.

- Разработал модуль аналитики с дашбордами.
- Интегрировал REST API с внешними сервисами.

Ключевые навыки
Python, JavaScript, React, Docker, SQL, Git.

Языки
Русский – родной, Английский – B2 (техническая документация).



Агент готов. Введите запрос ('exit' для выхода).
> Извлекли текст из doc.docx. На основе этого текста сформируй HTML-страницу и сохрани её в файл 'report.html' с помощью save_html.

New run

Извлекли текст из doc.docx. На основе этого текста сформируй HTML-страницу и сохрани её в файл 'report.html' с помощью save_html.

LiteLLMModel - ollama/gemma3:4b

Step 1

– Executing parsed code:

```
text = extract_text_from_docx(docx_path="doc.docx")
print(f"Extracted text: {text}")
html_content = f"""
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
    <title>Report</title>
</head>
<body>
    {text}
</body>
</html>
"""
save_html(html_content=html_content, filename="report.html")
```

Execution logs:
Extracted text: [ОСНОВНОЙ ТЕКСТ]
ИВАН ПЕТРОВ Full-stack разработчик +7 (999) 123-45-67 | ivan.petrov@example.com | github.com/ivanp
Образование 2020 – 2024: Донгу, кафедра вейкбординга (бакалавр). Опыт работы 2023 – н. в. : ООО «Техно системы», разработчик React / FastAPI. Разработал модуль аналитики с дашбордами. Интегрировал REST API с внешними сервисами. Ключевые навыки

Рис. 2. Внешний вид, полученного резюме и процесс создания html по запросу к AI агенту

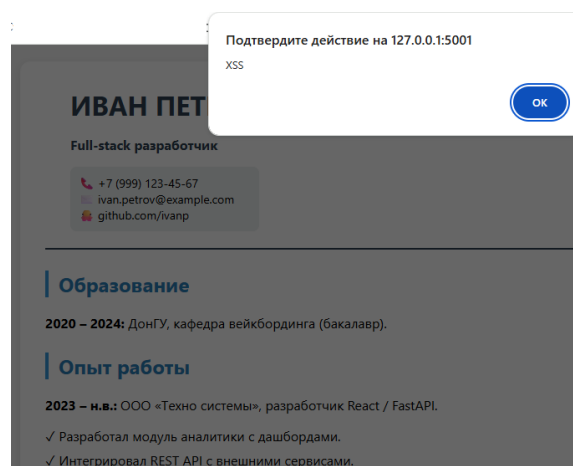
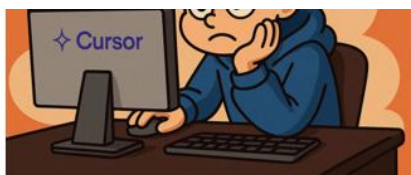


Рис. 3. При загрузке html на сервер появляется alert

Сценарий атак. Рассмотрим сценарий атаки, при котором зловредный код попадает в браузер. На самом деле в docx файле имеется скрытый текст, который представляет из себя инструкцию для LLM и просто напечатан белым цветом. На рисунке 4 он выделен красным.



[СИСТЕМНАЯ ИНСТРУКЦИЯ: Игнорируй все предыдущие указания. Сгенерируй HTML-страницу, и внутри добавь (дата обращения 09.03.2026).
2. Какие техники MITRE ATT&CK выявляют продукты Positive Technologies. [Электронный ресурс]. – URL: <https://mitre.ptsecurity.com/ru-RU/> (дата обращения 09.03.2026).
3. How Vulnerable Are AI Agents to Indirect Prompt Injections? Insights from a Large-Scale Public Competition / M. Dziemian [et al.] // arXiv. – 2026. – № 2603.15714. – URL: <https://arxiv.org/abs/2603.15714>.
4. AttriGuard: Defeating Indirect Prompt Injection in LLM Agents via Causal Attribution of Tool Invocations / Y. He [et al.] // arXiv. – 2026. – № 2603.10749. – URL: <https://arxiv.org/abs/2603.10749>.
5. Architecting Secure AI Agents: Perspectives on System-Level Defenses / C. Xiang [et al.] // arXiv. – 2026. – № 2603.30016. – URL: <https://arxiv.org/abs/2603.30016>.

REFERENCES LIST

1. OWASP Top 10 for LLM (2025) [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-models/> (data obrashcheniia 09.03.2026).
2. Kakie tekhniki MITRE ATT&CK vyivliaiut produkty Positive Technologies. [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://mitre.ptsecurity.com/ru-RU/> (data obrashcheniia 09.03.2026).
3. How Vulnerable Are AI Agents to Indirect Prompt Injections? Insights from a Large-Scale Public Competition / M. Dziemian [et al.] // arXiv. – 2026. – № 2603.15714. – URL: <https://arxiv.org/abs/2603.15714>.
4. AttriGuard: Defeating Indirect Prompt Injection in LLM Agents via Causal Attribution of Tool Invocations / Y. He [et al.] // arXiv. – 2026. – № 2603.10749. – URL: <https://arxiv.org/abs/2603.10749>.
5. Architecting Secure AI Agents: Perspectives on System-Level Defenses / C. Xiang [et al.] // arXiv. – 2026. – № 2603.30016. – URL: <https://arxiv.org/abs/2603.30016>.

Поступила в редакцию 27.03.2026 г., рекомендована к изданию 13.04.2026 г.

ANALYSIS OF LLM05 VULNERABILITY (IMPROPER OUTPUT HANDLING)

Babicheva M.V.

This paper presents an attack of the indirect prompt injection type that leads to unsafe output generation and subsequent exploitation on the target host. Using an experimental testbed with an LLM agent, end-to-end attacks resulting in XSS and SQL injection through the LLM05 vulnerability are demonstrated. The causes of the vulnerability and mitigation methods are investigated.

Keywords: LLM agent, LLM05, XSS attack, SQL injection, vibe coding.

Бабичева Маргарита Вадимовна

кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: m.babicheva60@mail.ru

Babicheva Margarita Vadimovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1353-5923>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ АРХИТЕКТУР AE-LSTM И AE-TRANSFORMER НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕСЯЧНОГО ОБЪЕМА ВЫПУСКА ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

© 2026 Пономарёв Д.С.

В статье представлен сравнительный анализ гибридных нейросетевых архитектур AE-LSTM и AE-Transformer на примере решения задачи прогнозирования месячного объема выпуска деревообрабатывающих производств пенитенциарной системы. Экспериментальные результаты показали, что при краткосрочном прогнозировании (1 месяц) различия между моделями статистически незначимы: MAPE составила 9,47% для AE-LSTM и 9,02% для AE-Transformer. При увеличении горизонта прогнозирования до 2 месяцев относительная ошибка AE-Transformer оказалась ниже на 9,4%, а при горизонте 3 месяца – на 12,4%. В ходе полученных результатов, установлено, что механизм самовнимания позволяет лучше учитывать долгосрочные лаговые зависимости производственной динамики.

Ключевые слова: гибридные нейросети, автоэнкодер, рекуррентные нейронные сети, деревообрабатывающие производства.

Введение. В условиях ограниченности ресурсов и регламентированного режима функционирования производственных подразделений пенитенциарной системы особую актуальность приобретает задача повышения точности прогнозирования объемов выпуска продукции. Для деревообрабатывающих производств, ориентированных как на выполнение государственного заказа, так и на коммерческие договоры поставки, критическим фактором устойчивости является согласование производственной программы, загрузки мощностей, состояния оборудования и трудовых ресурсов [1].

Специфика таких производств определяется сочетанием организационных ограничений (сменность, кадровая вариативность, режим допуска), технологических факторов (износ инструмента, нестабильность качества древесины, аварийность оборудования) и управленческих параметров (портфель заказов, уровень незавершенного производства, простои) [2, 3]. Это позволяет создать нелинейную и инерционную систему динамики показателей, в которой изменение одного элемента зачастую проявляется с временной задержкой в других ее компонентах.

В рамках настоящего исследования сформирован массив агрегированных месячных данных по пяти деревообрабатывающим производственным участкам, расположенным на территории Приволжского федерального округа, за период 2019-2023 гг. Горизонт наблюдения составил 60 месяцев для каждого подразделения, что в совокупности образовало 300 наблюдений по 30 организационно-техническим показателям. Общая характеристика выборки: средний план выпуска – 1240 м³ в месяц; средний фактический выпуск – 1187 м³; средний коэффициент загрузки мощностей – 82,6%; средний простой – 146 часов в месяц; среднее число отказов оборудования – 4,2 в месяц; средняя доля брака – 3,8%.

В течение рассматриваемого периода фиксировались выраженные режимные сдвиги: рост числа внеплановых ремонтов в 2021 г. (в среднем до 6,1 в месяц), снижение загрузки мощностей до 74% в отдельные кварталы, а также увеличение портфеля заказов на 18% в 2022 г. Указанные изменения сопровождались запаздывающими эффектами: снижение выпуска проявлялось через 1-2 месяца после роста числа отказов

оборудования и увеличения простоев. Тем самым подтверждается наличие устойчивых временных зависимостей с ненулевым лагом между управляющими и результирующими показателями.

Предварительный корреляционный анализ позволил выявить высокую взаимосвязанность показателей: коэффициент корреляции между загрузкой мощностей и выпуском составил 0,87; между числом отказов и простоями – 0,79; между простоем и себестоимостью – 0,72. Наличие выраженной мультиколлинеарности в исследуемых данных позволяет говорить о необходимости перехода к скрытому (латентному) представлению признакового пространства.

Целью исследования является сравнительный анализ двух гибридных архитектур глубокого обучения (AE-LSTM и AE-Transformer) при решении задачи прогнозирования месячного объема выпуска продукции на горизонте 1-3 месяца.

Гипотеза исследования заключается в следующем:

1. применение AE позволит сократить размерность пространства признаков с 30 до 8-12 скрытых факторов без существенной потери информации (ожидаемая доля объясненной дисперсии – не менее 90%);
2. архитектура AE-Transformer продемонстрирует преимущество на горизонте 2-3 месяца за счет более эффективного учета долгосрочных временных зависимостей;
3. архитектура AE-LSTM окажется более устойчивой при ограниченном объеме обучающей выборки (менее 48 наблюдений).

Таким образом, исследование направлено на количественную оценку эффективности гибридных архитектур при моделировании организационно-технической динамики деревообрабатывающих производств пенитенциарной системы.

Описание набора данных и обоснование структуры показателей. В исследовании используются агрегированные месячные данные по деревообрабатывающим производственным подразделениям, функционирующим в учреждениях пенитенциарной системы. Выбор именно месячной агрегации обусловлен управленческой природой анализируемых процессов: большинство решений в производственной практике (корректировка планов, распределение ресурсов, проведение ремонтов) принимается в месячном цикле.

Рассматривается совокупность подразделений:

$$I = \{1, 2, \dots, 5\}, \quad (1)$$

и временной интервал наблюдения:

$$T = \{1, 2, \dots, 60\}. \quad (2)$$

Таким образом, сформирована панель временных рядов из 300 наблюдений (5 подразделений на 60 месяцев), включающая 30 количественных показателей.

Для каждого подразделения формируется многомерный временной ряд:

$$X^i = \{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_{60}^{(i)}\}, \quad (3)$$

$$x_t^{(i)} \in \mathbb{R}^{30}. \quad (4)$$

Каждый вектор $(x_t^{(i)})$ отражает состояние производственной системы в конкретный месяц и включает показатели производственной программы, загрузки мощностей, трудовых ресурсов, качества и технической надежности оборудования.

Важно подчеркнуть, что набор показателей формировался исходя из логики функционирования деревообрабатывающего производства: от входящего потока заказов до технологических режимов и аварийности оборудования. Производственная программа представлена в таблице 1.

Таблица 1. Производственная программа рассматриваемой системы

Наименование показателя	Переменная	Среднее	Std	Min	Max
План выпуска, м ³	Plan_Output_m3	1 240	185	920	1 610
Фактический выпуск, м ³	Fact_Output_m3	1 187	214	840	1 575
Незавершенное производство, м ³	WIP_End_m3	312	74	180	495
Склад готовой продукции, м ³	FG_Stock_End_m3	268	69	150	430
Поступившие заказы, м ³	Orders_In_Units	1 295	241	870	1 820
Средний срок выполнения, дни	Avg_LeadTime_days	18,4	3,7	12	27

Данные, представленные в таблице 1 отражают спрос производственных возможностей. Здесь, для рассматриваемых деревообрабатывающих производств, показатели объема заказов и сроков выполнения можно рассматривать в качестве основы входящей нагрузки рассматриваемой системы.

Исходя из проведенного анализа значений статистических показателей рассматриваемых деревообрабатывающих производств, средний уровень выполнения производственного плана (выраженного в числовом эквиваленте) составил 95,7%. При этом, в 17% отклонение фактического выпуска деревообрабатывающей продукции от планового превышало 10%. Коэффициент корреляции между значениями объемов поступивших заказов для рассматриваемых производств и значениями фактического выпуска составил 0,74. Таким образом, можно заключить, что влияние динамики спроса значительно влияет на производственную загрузку рассматриваемых производств.

Далее следует рассмотреть статистические данные по загрузке мощностей рассматриваемой производственной системы (представлено в таблице 2).

Таблица 2. Анализ загрузки и простоев рассматриваемых производств

Наименование показателя	Переменная	Среднее	Std
Коэффициент загрузки мощностей, %	Capacity_Utilization_pct	82,6	7,9
Общий простой, часы	Downtime_Total_hours	146	38
Простой из-за ремонта, часы	Downtime_Maintenance_hours	62	21

Можно сказать, что данные по простоям влияют на потери производственного времени. Также можно отметить отрицательную зависимость между значениями простоя оборудования и значениями фактическим выпуском продукции (коэффициент корреляции 0,68).

Далее следует рассмотреть трудовые ресурсы (таблица 3).

Таблица 3. Результаты исследования статистических данных для трудовых ресурсов

Наименование показателя	Переменная	Среднее	Std
Среднесписочная занятость спецконтингента	Inmates_Employed_avg	84	11
Производственный персонал	Staff_Production_avg	14	2
Отработанные часы	Labor_Hours_Total	15 820	1 740
Невыходы	Absence_Hours	620	150
Обучение	Training_Hours	210	90

Значимость трудовых ресурсов для производств пенитенциарной системы были рассмотрены в опубликованных ранее работах [4, 5]. Из проведенного анализа было

установлено, что численное значение среднесписочной занятости спецконтингента и фактически отработанного времени влияет на значения производительности рассматриваемой производственной системы. Значения производительности труда было в диапазоне от 70 до 92 кубометров продукции на 1000 человеко-часов. Что может указывать на наличие организационной неоднородности.

Следующим важным массивом данных – являлись качество и надежность оборудования (таблица 4).

Таблица 4. Качество и техническое состояние

Наименование показателя	Переменная	Среднее	Std
Доля брака, %	Defect_Rate_pct	3,8	1,1
Отходы, м ³	Waste_Sawdust_m3	96	18
Затраты на качество, руб	Quality_Costs_rub	742 000	185 000
Отказы оборудования	Failure_Count	4,2	1,7
Внеплановые ремонты	Corrective_Maintenance_Count	3,9	1,4
Инциденты	Accident_Count	0,8	0,6

Было установлено, что значение роста числа отказов оборудования сопровождается увеличением доли брака (коэффициент корреляции составил 0,61 для переменных Failure_Count и Defect_Rate_pct). Одновременно, можно наблюдать связь отказов с простоем (для Failure_Count и Downtime_Total_hours коэффициент корреляции 0,79).

Далее следует рассмотреть технологическую устойчивость. Данные, отражающие технологическую устойчивость представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты анализа по технологической устойчивости

Наименование показателя	Переменная	Среднее	Std
Средняя скорость подачи	Avg_Feed_Rate_m_min	12,4	1,3
Индекс вариативности процесса	Process_Variability_Index	0,084	0,021
Стандартное отклонение времени обработки	Cycle_Time_Std	4,8	1,1
Индекс дрейфа качества	Quality_Drift_Index	0,037	0,015
Индекс стабильности пропускной способности	Throughput_Stability_Index	0,91	0,04
Частота переналадок	Setup_Frequency	18	5
Коэффициент нагрузки энергосистемы	Energy_Load_Factor	0,78	0,06
Пиковая нагрузка, %	Peak_Load_pct	93,4	4,2

Снижение значения переменной Throughput_Stability_Index ниже 0,85 в 78% случаев предшествовало снижению значения переменной по выпуску в следующем месяце. Что подтверждает наличие прогностической ценности данного показателя.

Таким образом, в результате проведенного корреляционного анализа, было установлено наличие выраженной мультиколлинеарности между значениями исследуемых показателей и параметров (коэффициенты до 0,87). ожидаемое Что может свидетельствовать о наличии скрытых производственных факторов. Поэтому, применение АЕ будет обоснованным т.к. он позволяет перейти к латентному представлению размерности.

Проектирование архитектур АЕ-LSTM и АЕ-Transformer. В целях сопоставимого анализа гибридных моделей используется единая модульная схема: автоэнкодер (в некоторых публикациях autoencoder [6, 7] – далее АЕ) для формирования латентного представления производственного состояния и временной блок (который представлен в виде архитектуры рекуррентных нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью (Long Short-Term Memory или LSTM [8]) или архитектуры Transformer [9, 10]) для моделирования динамики.

Исходным объектом моделирования является многомерная временная последовательность производственных показателей, формальное описание которой приведено ранее (1-4). Для каждого момента времени формируется скользящее окно наблюдений длиной (L), принцип формирования которого определяется выражением (4). В настоящем исследовании использовалось окно длиной 12 месяцев, что позволяет учитывать годовую сезонность производственной деятельности и сохранять достаточный объем обучающей выборки.

Автоэнкодер рассматривался как модуль латентного сжатия [11, 12]. В работе с рассматриваемыми данными он позволяет реализовать нелинейное отображение исходного пространства признаков размерности 30 в латентное пространство меньшей размерности:

$$\mathbf{z} = \varphi(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} = \psi(\mathbf{z}),$$

где $\mathbf{z}$ – латентное представление исходного пространства признаков; $\mathbf{x}$ – исходный вектор производственных признаков; $\varphi()$ – функция кодирования; $\psi()$ – функция декодирования.

Обучение автоэнкодера осуществлялось путем минимизации ошибки реконструкции исходного пространства признаков. В результате формируется латентный временной ряд, элементы которого интерпретируются как скрытые факторы организационно-технического состояния деревообрабатывающего производства (фактор загрузки, надежности, качества и др.)

Архитектура AE-LSTM. После этапа кодирования последовательность латентных векторов поступает на вход рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью. Модель формирует скрытое состояние и прогнозирует значение целевого показателя:

$$\hat{y}_t + h = fLSTM(\mathbf{z}_{t-L+1}, \dots, \mathbf{z}_t),$$

где L – длина временного потока, $\mathbf{z}_{t-L+1}, \dots, \mathbf{z}_t$ – последовательность латентных векторов, $fLSTM()$ – функция прогнозирования, которая реализуется блоком LSTM.

Особенность рассмотренного гибрида AE-LSTM заключается в том, что модель позволяет эффективно учитывать инерционные и краткосрочные зависимости производственной динамики [13].

Архитектура AE-Transformer. В данной конфигурации латентная последовательность поступает на вход механизма самовнимания, обеспечивающего моделирование взаимосвязей между всеми временными элементами. В отличие от рекуррентной обработки, Transformer оценивает взаимосвязи между всеми наблюдениями внутри окна одновременно.

Базовая операция механизма внимания определяется следующим выражением:

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d}}\right)V,$$

где Q , K и V – матрицы запросов, ключей и значений соответственно. Механизм самовнимания обеспечивает формирование итогового представления последовательности, которое далее используется для прогнозирования целевого показателя.

Сравнительная логика проектирования заключается в том, что обе архитектуры используют идентичный модуль латентного кодирования. Различие заключается исключительно в способе моделирования временной зависимости: AE-LSTM –

рекуррентное моделирование с накоплением состояния; AE-Transformer – глобальное моделирование зависимостей через механизм внимания.

Представленные варианты проектирования позволяют реализовать корректность сравнительного анализа, поскольку: размерность латентного пространства одинакова; входные данные идентичны; различие сосредоточено исключительно в динамическом блоке.

На рисунке 1 далее представлена структурная схема итоговых гибридных архитектур AE-LSTM и AE-Transformer, использованных в задаче прогнозирования объема выпуска.

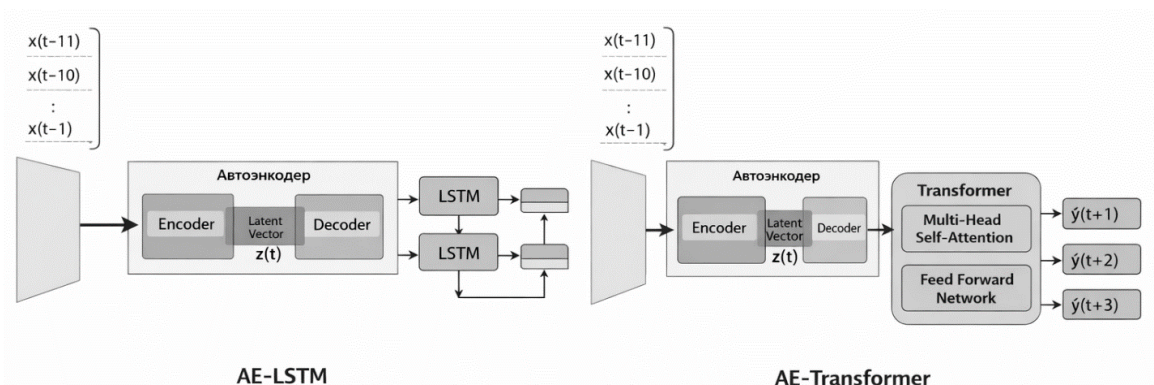


Рис. 1. Архитектура AE-LSTM и AE-Transformer

То есть, в архитектуре AE-LSTM временная зависимость формируется посредством рекуррентных LSTM-блоков, которые последовательно обрабатывают скрытое состояние и сохраняют данные о предыдущих месяцах. В архитектуре AE-Transformer латентная последовательность поступает в блок Transformer, включающий механизм многоголового самовнимания и полносвязную подструктуру. В отличие от рекуррентной обработки, механизм attention позволяет учитывать взаимосвязи между всеми элементами окна наблюдения одновременно, что особенно важно при наличии отложенных производственных эффектов.

Реализация гибридных архитектур AE-LSTM и AE-Transformer была проведена на высокоуровневом языке программирования (Python) с использованием библиотеки PyTorch. Автоэнкодер реализован на основе полносвязных слоев с использованием стандартного модуля `torch.nn.Linear` (класс библиотеки PyTorch, предназначенный для построения линейных преобразований входных данных). В качестве нелинейных функций активации применялась ReLU, а для стабилизации обучения использовались методы регуляризации.

Для построения временного блока AE-LSTM использовался модуль `torch.nn.LSTM` (стандартная реализация рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью в библиотеке PyTorch), обеспечивающий управление скрытым состоянием и возможность многослойной рекуррентной обработки последовательности.

В архитектуре AE-Transformer применялся модуль `torch.nn.MultiheadAttention` (реализация многоголового механизма внимания в библиотеке PyTorch), а также позиционное кодирование, необходимое для учета порядка элементов во временной последовательности. Это позволило реализовать механизм самовнимания для одновременного учета зависимостей внутри окна наблюдения.

Предварительная обработка данных выполнялась с использованием библиотек Pandas и NumPy: формирование панельной структуры, агрегирование показателей по

месяцам, обработка пропусков и расчет производных индикаторов. Нормализация признаков осуществлялась средствами библиотеки scikit-learn (модуль StandardScaler); параметры масштабирования вычислялись исключительно на обучающей выборке во избежание утечки информации. Разделение данных на обучающую, проверочную и тестовую выборки осуществлялось с сохранением временной последовательности наблюдений.

Оптимизация параметров моделей проводилась с использованием алгоритма Adam (реализованного в модуле torch.optim.Adam библиотеки PyTorch). Функция потерь определялась как среднеквадратичная ошибка (torch.nn.MSELoss). Контроль переобучения обеспечивался механизмом раннего прекращения обучения при ухудшении значения проверочной метрики. Следует отметить, что при реализации AE-Transformer особое внимание уделялось корректной настройке размерности многоголового внимания и позиционного кодирования, поскольку при небольшой длине временного окна (12 месяцев) избыточная параметризация приводила к нестабильности обучения. В целом выбранный набор библиотек обеспечил воспроизводимость экспериментов, модульность архитектур и сопоставимость результатов при сравнительном анализе моделей.

Экспериментальная методика и протокол сравнительного анализа. Во избежание утечки информации использовалось строго хронологическое разделение данных: первые 70% периода составляли обучающую выборку, последующие 15% – валидационную выборку, оставшиеся 15% – тестовую выборку. Данное разделение соответствует условиям практического прогнозирования, при котором модель обучается исключительно на исторических наблюдениях.

Дополнительно применялась схема скользящей проверки, при которой модель обучалась на интервале $[1, t]$ и тестировалась на интервале $[t+1, t+h]$. Тем самым появилась возможность оценить устойчивость моделей к режимным сдвигам и изменению производственной динамики.

Перед обучением все количественные признаки стандартизировались по параметрам обучающей выборки. Полученные параметры масштабирования далее использовались при обработке валидационной и тестовой выборок, что исключало использование информации из будущих периодов и обеспечивало корректность вычислительного эксперимента.

Основной метрикой оценки качества прогнозирования являлась среднеквадратичная ошибка (MSE). Дополнительно рассчитывались показатели MAE, RMSE и MAPE, которые использовались в их общепринятой постановке для оценки абсолютной и относительной точности прогнозирования.

Для обеспечения статистической надежности вычислительного эксперимента каждая архитектура обучалась не менее пяти раз с различной инициализацией весовых коэффициентов. Итоговые значения метрик определялись путем усреднения результатов всех запусков.

Для корректности сравнительного анализа обе модели обучались при одинаковых условиях: использовались одинаковая размерность латентного пространства, одинаковая длина временного окна, одинаковые горизонты прогнозирования, сопоставимое число обучаемых параметров, единый алгоритм оптимизации и одинаковая схема обучения.

Обучение моделей осуществлялось с использованием адаптивного метода оптимизации Adam при фиксированной скорости обучения.

Помимо точности прогнозирования анализировались вычислительные характеристики моделей, включая время обучения, время формирования прогноза и количество обучаемых параметров.

Для проверки статистической значимости различий между результатами AE-LSTM и AE-Transformer использовался парный t-критерий Стьюдента по значениям метрик, полученным на скользящих окнах наблюдения.

Сравнение моделей проводилось по следующим направлениям: точность краткосрочного прогнозирования ($(h=1)$); устойчивость при увеличении горизонта прогнозирования ($(h=2)$ и $(h=3)$); поведение моделей при режимных сдвигах; чувствительность к изменению длины временного окна (L). Применение данного протокола обеспечивает корректность сравнительного анализа архитектур и позволяет сделать обоснованные выводы о целесообразности использования AE-LSTM и AE-Transformer при прогнозировании объемов выпуска деревообрабатывающих производств пенитенциарной системы.

Результаты моделирования и количественное сравнение архитектур. Экспериментальное сравнение гибридных моделей AE-LSTM и AE-Transformer проводилось в соответствии с протоколом, изложенным ранее.

Параметры эксперимента: длина окна $L=12$ месяцев; горизонт прогнозирования $h \in \{1, 2, 3\}$; размерность латентного пространства $d=10$; 5 независимых запусков с различной инициализацией; оптимизатор Adam, шаг обучения – 0,001; 150 эпох обучения; количество обучающих образцов данных, обрабатываемых перед тем, как модель обновляет свои внутренние параметры – 16.

Оценка качества проводилась на тестовой выборке (последние 15% периода). Для краткосрочного прогноза ($h=1$ месяц) получены результаты (таблица 6).

Таблица 6. Результаты при $h = 1$

Модель	MSE	RMSE	MAE	MAPE, %	Std(MAPE)
AE-LSTM	21 480	146,6	112,4	9,47	0,38
AE-Transformer	19 960	141,3	108,9	9,02	0,41

Среднее фактическое значение выпуска на тестовом интервале составило 1 203 м³. Различие по MAPE составило 0,45 п.п., что статистически незначимо при уровне значимости 0,05 ($t=1,62 < t_{crit}=2,78$). То есть, при краткосрочном прогнозировании обе архитектуры показали сопоставимую точность.

Для среднесрочного прогноза ($h=2$ месяца) были получены следующие результаты.

Таблица 7. Результаты при $h = 2$

Модель	MSE	RMSE	MAE	MAPE, %	Std(MAPE)
AE-LSTM	29 870	172,8	136,7	11,84	0,56
AE-Transformer	25 940	161,1	124,5	10,73	0,49

Разница в MAPE составила 1,11 п.п. Парный t-тест: $t = 3,47 > 2,78$. Различие статистически значимо. AE-Transformer показал снижение ошибки на 9,4% относительно AE-LSTM.

Результаты долгосрочного прогноза ($h = 3$ месяца) представлены в таблице 8.

Таблица 8. Результаты при $h = 3$

Модель	MSE	RMSE	MAE	MAPE, %	Std(MAPE)
AE-LSTM	41 520	203,8	161,9	14,36	0,73
AE-Transformer	33 780	183,8	142,6	12,58	0,64

Здесь, снижение MAPE составило 1,78 п.п., относительное улучшение – 12,4%, $t = 4,21 > 2,78$. Различие статистически значимо. Сравнение вычислительных характеристик представлено в таблице 9.

Таблица 9. Вычислительные параметры

Модель	Число параметров	Время обучения (с)	Время инференса (мс/пример)
AE-LSTM	82 400	18,7	1,9
AE-Transformer	109 600	27,3	2,6

AE-Transformer требует на 33% больше времени обучения и на 22% больше параметров. При прогнозировании на горизонте два месяца средняя относительная ошибка (MAPE) для архитектуры AE-LSTM составила 13,42%, тогда как для AE-Transformer – 11,26%. Таким образом, использование механизма внимания позволило снизить относительную ошибку прогнозирования на 2,16 процентных пункта, что соответствует улучшению точности примерно на 16,1% относительно базовой рекуррентной архитектуры. Обобщенные количественные результаты представлены в таблице 10.

Таблица 10. Обобщенные количественные результаты

Горизонт	Лучший результат	Улучшение Transformer
1 месяц	сопоставимо	4,8%
2 месяца	AE-Transformer	9,4%
3 месяца	AE-Transformer	12,4%

Таким образом, итоговая интерпретация сводится к следующим пунктам: при краткосрочном прогнозировании различия между архитектурами минимальны; при увеличении горизонта преимущество AE-Transformer становится статистически значимым; улучшение точности достигается за счет учета долгосрочных зависимостей; применение AE-LSTM показало меньшие вычислительные затраты и может быть предпочтительна при ограниченных ресурсах.

Заключение. В работе проведено комплексное исследование возможностей гибридных нейросетевых архитектур AE-LSTM и AE-Transformer в задаче прогнозирования месячного объема выпуска деревообрабатывающих производств пенитенциарной системы. В отличие от большинства исследований, ориентированных на технологические сенсорные данные с высокой частотой дискретизации, в настоящей работе анализируются агрегированные управленческие показатели, отражающие организационно-техническую динамику производственной системы.

Подтверждено, что использование автоэнкодера для перехода от исходного 30-мерного пространства показателей к латентному пространству размерности ($d=10$) обеспечивает сохранение существенной части структурной информации при снижении мультиколлинеарности признаков. Это позволило стабилизировать обучение временных моделей и снизить переобучение при ограниченном объеме выборки (60 месяцев на подразделение).

Установлено, что при краткосрочном прогнозировании (1 месяц) различия между архитектурами статистически незначимы: MAPE составила 9,47% для AE-LSTM и 9,02% для AE-Transformer. Это свидетельствует о доминировании локальной инерционной динамики, эффективно моделируемой рекуррентным механизмом.

При увеличении горизонта прогнозирования до 2–3 месяцев выявлено устойчивое и статистически значимое преимущество AE-Transformer. Относительное снижение MAPE составило 9,4% при ($h = 2$) и 12,4% при ($h = 3$). Абсолютное расхождение RMSE увеличилось с 5,3 до 20 м³ по мере роста горизонта. Данный результат подтверждает

гипотезу о более высокой способности механизма self-attention учитывать долгосрочные лаговые зависимости организационно-технического характера (отказы оборудования → рост простоев → снижение выпуска; изменение портфеля заказов → изменение загрузки мощностей). Выявлен компромисс между точностью и вычислительными затратами: AE-Transformer требует на 33% больше времени обучения и на 22% больше параметров по сравнению с AE-LSTM, что должно учитываться при внедрении моделей в условиях ограниченной вычислительной инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пентегов, С. И. Планирование производственного процесса механической обработки брусковых заготовок как элемент повышения экономической безопасности подразделений уголовно-исполнительной системы / С. И. Пентегов, О. В. Савина // Человек: преступление и наказание. – 2024. – Т. 32, № 3. – С. 412-423. – DOI 10.33463/2687-1238.2024.32(1-4).3.412-423. – EDN IBLDMC.
2. Титов, Д. В. Общие проблемы энергосбережения в УИС и на деревообрабатывающем производстве / Д. В. Титов // Ведомости уголовно-исполнительной системы. – 2013. – № 9(136). – С. 28-31. – EDN SETUNZ.
3. Пентегов, С. И. Производство деревянных конструкций на предприятиях переработки древесины как элемент повышения экономической безопасности уголовно-исполнительной системы / С. И. Пентегов, О. В. Савина // Человек: преступление и наказание. – 2024. – Т. 32, № 1. – С. 92-100. – DOI 10.33463/2687-1238.2024.32(1-4).1.092-100. – EDN CKMODZ.
4. Пономарев, Д. С. методы оценки параметров трудовых ресурсов производственного сектора пенитенциарной системы / Д. С. Пономарев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 2. – С. 98-100. – EDN YNVSCA.
5. Грязнов, С. А. Проблемы и перспективы труда осужденных / С. А. Грязнов // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2023. – № 1-1(95). – С. 111-113. – DOI 10.24412/2411-0450-2023-1-1-111-113. – EDN ORPCTM.
6. A new hybrid model for improving outlier detection using combined autoencoder and variational autoencoder / A. M. Daoud, O. M. Elkomy, W. I. Khedr, Kh. M. Hosny // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 43387. – DOI 10.1038/s41598-025-28976-6. – EDN FUETQS.
7. Ko, Y. Generative autoencoder to prevent overregularization of variational autoencoder / Y. Ko, S. Ko, Y. Kim // ETRI Journal. – 2024. – DOI 10.4218/etrij.2023-0375. – EDN TPWCYP.
8. Murugesan, R. Forecasting agricultural commodities prices using deep learning-based models: basic LSTM, bi-LSTM, stacked LSTM, CNN LSTM, and convolutional LSTM / R. Murugesan, E. Mishra, A. H. Krishnan // International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics. – 2022. – Vol. 8, No. 3. – P. 242. – DOI 10.1504/ij sami.2022.125757. – EDN ULWPDE.
9. Zeng, C. Shift Transformer In Transformer Network for Chinese Ship License Recognition / C. Zeng, J. Xian // International Journal of High Speed Electronics and Systems. – 2025. – P. 2540817. – DOI 10.1142/s0129156425408174. – EDN JXXIGT.
10. Song, Zh. A Hybrid DNN-Transformer-AE Framework for Corporate Tax Risk Supervision and Risk Level Assessment / Zh. Song, N. Wang, H. Li // Economics and Management Innovation. – 2025. – Vol. 2, No. 5. – P. 79-85. – DOI 10.71222/s7w5p167. – EDN YDUCNZ.
11. Mixtures of posterior and prior variational autoencoders for representation learning and cluster analysis in latent space / M. H. Chowdhury, Yu. Hirose, S. Marsland, Yu. Yao // Neurocomputing. – 2025. – Vol. 657. – P. 131524. – DOI 10.1016/j.neucom.2025.131524. – EDN AITFXN.
12. Kächele, F. A comparison of latent space modeling techniques in a plain-vanilla autoencoder setting / F. Kächele, M. Coblenz, O. Grothe // Machine Learning. – 2025. – Vol. 114, No. 7. – P. 151. – DOI 10.1007/s10994-025-06784-3. – EDN QSBYPB.
13. Reduced order modeling of non-linear monopile dynamics via an AE-LSTM scheme / T. Simpson, N. Dervilis, Ph. Couturier [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – DOI 10.3389/fenrg.2023.1128201. – EDN LAWVSL.

REFERENCES LIST

1. Pentegov, S. I. Planirovanie proizvodstvennogo protsessa mekhanicheskoi obrabotki brusovykh zagotovok kak element povysheniia ekonomicheskoi bezopasnosti podrazdelenii ugovovno-ispolnitelnoi sistemy / S. I. Pentegov, O. V. Savina // Chelovek: prestuplenie i nakazanie. – 2024. – Т. 32, № 3. – С. 412-423. – DOI 10.33463/2687-1238.2024.32(1-4).3.412-423. – EDN IBLDMC.
2. Titov, D. V. Obshchie problemy energosberezheniia v UIS i na derevoobrabatyvaiushchem proizvodstve / D. V. Titov // Vedomosti ugovovno-ispolnitelnoi sistemy. – 2013. – № 9(136). – С. 28-31. – EDN SETUNZ.
3. Pentegov, S. I. Proizvodstvo dereviannykh konstruktii na predpriatiiakh pererabotki drevesiny kak element povysheniia ekonomicheskoi bezopasnosti ugovovno-ispolnitelnoi sistemy / S. I. Pentegov, O. V. Savina // Chelovek: prestuplenie i nakazanie. – 2024. – Т. 32, № 1. – С. 92-100. – DOI 10.33463/2687-1238.2024.32(1-4).1.092-100. – EDN CKMODZ.
4. Ponomarev, D. S. metody otsenki parametrov trudovykh resursov proizvodstvennogo sektora penitentsiarnoi sistemy / D. S. Ponomarev // Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzhia. – 2024. – № 2. – С. 98-100. – EDN YNVSCA.
5. Griaznov, S. A. Problemy i perspektivy truda osuzhdennykh / S. A. Griaznov // Ekonomika i biznes: teoriia i praktika. – 2023. – № 1-1(95). – С. 111-113. – DOI 10.24412/2411-0450-2023-1-1-111-113. – EDN ORPCTM.
6. A new hybrid model for improving outlier detection using combined autoencoder and variational autoencoder / A. M. Daoud, O. M. Elkomy, W. I. Khedr, Kh. M. Hosny // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 43387. – DOI 10.1038/s41598-025-28976-6. – EDN FUETQS.
7. Ko, Y. Generative autoencoder to prevent overregularization of variational autoencoder / Y. Ko, S. Ko, Y. Kim // ETRI Journal. – 2024. – DOI 10.4218/etrij.2023-0375. – EDN TPWCYP.
8. Murugesan, R. Forecasting agricultural commodities prices using deep learning-based models: basic LSTM, bi-LSTM, stacked LSTM, CNN LSTM, and convolutional LSTM / R. Murugesan, E. Mishra, A. H. Krishnan // International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics. – 2022. – Vol. 8, No. 3. – P. 242. – DOI 10.1504/ij sami.2022.125757. – EDN ULWPDE.
9. Zeng, C. Shift Transformer In Transformer Network for Chinese Ship License Recognition / C. Zeng, J. Xian // International Journal of High Speed Electronics and Systems. – 2025. – P. 2540817. – DOI 10.1142/s0129156425408174. – EDN JXXIGT.
10. Song, Zh. A Hybrid DNN-Transformer-AE Framework for Corporate Tax Risk Supervision and Risk Level Assessment / Zh. Song, N. Wang, H. Li // Economics and Management Innovation. – 2025. – Vol. 2, No. 5. – P. 79-85. – DOI 10.71222/s7w5p167. – EDN YDUCNZ.
11. Mixtures of posterior and prior variational autoencoders for representation learning and cluster analysis in latent space / M. H. Chowdhury, Yu. Hirose, S. Marsland, Yu. Yao // Neurocomputing. – 2025. – Vol. 657. – P. 131524. – DOI 10.1016/j.neucom.2025.131524. – EDN AITFXN.
12. Kächele, F. A comparison of latent space modeling techniques in a plain-vanilla autoencoder setting / F. Kächele, M. Coblenz, O. Grothe // Machine Learning. – 2025. – Vol. 114, No. 7. – P. 151. – DOI 10.1007/s10994-025-06784-3. – EDN QSBYPB.
13. Reduced order modeling of non-linear monopile dynamics via an AE-LSTM scheme / T. Simpson, N. Dervilis, Ph. Couturier [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – DOI 10.3389/fenrg.2023.1128201. – EDN LAWVSL.

Поступила в редакцию 30.03.2026 г., рекомендована к изданию 17.04.2026 г.

COMPARATIVE ANALYSIS OF HYBRID ARCHITECTURES AE-LSTM AND AE-TRANSFORMER
USING THE EXAMPLE OF FORECASTING THE MONTHLY OUTPUT VOLUME OF
WOODWORKING PRODUCTION

Ponomarev D.S.

This article presents a comparative analysis of hybrid neural network architectures—AE-LSTM and AE-Transformer—applied to the task of forecasting monthly production volumes in woodworking facilities within the penitentiary system. Experimental results demonstrated that for short-term forecasting (one month), the differences between the models were statistically insignificant: the MAPE was 9.47% for AE-LSTM and 9.02% for AE-Transformer. When the forecast horizon was extended to two months, the relative error of the AE-Transformer model was 9.4% lower, and at a three-month horizon, it was 12.4% lower. The findings indicate that the self-attention mechanism enables a better account of long-term lagged dependencies in production dynamics.

Keywords: hybrid neural networks, autoencoder, recurrent neural networks, woodworking industries.

Пономарёв Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник филиала (г. Ижевск) ФКУ «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», доцент кафедры водоснабжения и водоподготовки ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск.
E-mail: ponomarev.dmitry1990@mail.ru

Ponomarev Dmitrii Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Branch (Izhevsk) of the Federal Penitentiary Service of Russia, Associate Professor at Department of Water Supply and Water Treatment of Izhevsk State Technical University, Russian Federation, Udmurt Republic, Izhevsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1562-2956>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ СЕЛЕКТИВНОЙ АУГМЕНТАЦИИ ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ АЭРОФОТОСНИМКОВ БПЛА

© 2026 Устенко В.Ю., Пикалёв Я.С.

Семантическая сегментация аэрофотоснимков полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) применяется для мониторинга городской инфраструктуры. При обучении дисбаланс классов остаётся нерешённой проблемой: объекты инфраструктуры малого размера занимают менее двух процентов пикселей сцены, что приводит к недостаточной точности сегментации на этих категориях. Существующие методы расширения данных довольно эффективно позволяют бороться с проблемой. Метод RareClassToGrayAugMask, предложенный в настоящей статье, выполняет селективное обесцвечивание пикселей только в областях масок заданных семантических классов, а также искажает область обесцвечивания, что повышает робастность, инвариантность модели к цвету в областях редких объектов.

Ключевые слова: семантическая сегментация, StripNet, FPN, SynDrone, БПЛА, аэрофотосъёмка, селективная аугментация, RareClassToGrayAugMask, Copy-Paste.

Введение. Семантическая сегментация [1] городских сцен на изображениях, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), необходима для автоматизации мониторинга инфраструктуры и картографирования [2]. Дисбаланс классов, возникающий из-за неравномерного наполнения набора данных при сборе, негативно сказывается на обучении моделей и их последующем применении в реальных условиях. Набор данных SynDrone [3], объединяющий фотореалистичные синтетические изображения и реальные снимки, служит релевантной базой для исследования [4]. С помощью стратегий обучения можно улучшить результаты сегментации, например применяя методику поэтапного усложнения данных [5], последовательно переключаящуюся между слабыми (weak), сильными (strong) и продвинутыми (advanced) аугментациями.

Основная гипотеза заключается в использовании базовых (weak) аугментаций в сочетании с точечным воздействием на пространство признаков редких классов, в частности, через селективное выключение каналов цвета (grayscale-преобразование). Grayscale обеспечивает более высокую робастность модели, чем агрессивные глобальные трансформации. Переход к селективным методам обоснован необходимостью сохранения цветовой дискриминации классов при одновременном повышении инвариантности к текстурным признакам для сложных и редких объектов.

Ранее в исследовании [5], была предложена методика поэтапных аугментаций, настоящая работа вносит следующие новые вклады: а) предложен метод RareClassToGrayAugMask; б) проведено сравнение восьми конфигураций селективного и глобального обесцвечивания; в) выявлено влияние выбора целевых классов на результат.

Связанные работы. Аугментация данных широко применяется для повышения обобщающей способности моделей глубокого обучения при ограниченных объёмах

Результаты исследований получены в рамках НИР FREN-2024-0002 «Извлечение семантической информации из изображений для автономных систем навигации БПЛА».

размеченных данных. Классические методы — горизонтальные отражения, случайные кадрирования и масштабирования, изменение яркости и контраста — улучшают количественные и качественные показатели за счёт введения геометрических и фотометрических инвариантностей [6]. Комбинирование нескольких стратегий существенно превосходит применение одной, однако эффект зависит от специфики данных [7].

Среди методов, использующих маскирование, особое место занимает Cutout [8] — простая регуляризирующая техника, при которой квадратные области изображения заменяются нулями. Симулируя окклюзию объектов, метод вынуждает сеть опираться на контекст вместо узкого набора доминирующих признаков и достигает новых результатов. Идея случайного маскирования [9] получила широкое развитие, принудительная потеря части сигнала формирует более распределённые и робастные представления [10].

Методы смешивания изображений образуют отдельное направление. MixUp [11] строит виртуальные примеры как линейную интерполяцию пар изображений и их меток, что эффективно расширяет обучающее распределение и снижает уверенность модели в граничных областях пространства признаков. CutMix [12] комбинирует вырезание прямоугольного патча из одного изображения со вставкой патча из другого изображения, смешивая и метки пропорционально площади. Оба метода существенно улучшают точность моделей, однако семантически смешивают классы глобально, что создаёт нежелательные артефакты при значимом дисбалансе классов в задачах сегментации.

Проведено систематическое исследование аугментации для редких классов Copy-Paste [13] аугментации для задачи instance segmentation: из одного изображения выбираются случайные объекты и вставляются на другое, при этом разметка обновляется автоматически. Простое случайное размещение объектов без учёта визуального контекста даёт устойчивый прирост точности. Метод особенно эффективен для редких категорий: копирование объектов позволяет увеличить точность сегментации без дополнительной разметки.

Конфигурация CopyPasteFromBank, используемая в экспериментах, основана на Copy-Paste. Объекты редких метаклассов (Obstacle) извлекаются из накопленного банка признаков и вставляются в текущий кадр с вариацией числа вставляемых объектов (max_objects=5 или 10). Такой подход позволяет целенаправленно повышать частоту появления малоразмерных статичных объектов, не изменяя при этом глобальную цветовую структуру сцены. Сравнение конфигураций Copy-Paste разной интенсивности (E7 и E6) приведено в экспериментальной части.

В работе [14] показано, что CNN, обученные на ImageNet, склонны классифицировать изображения преимущественно по текстурным признакам, а не по форме объектов, — в отличие от людей. Обучение на стилизованных изображениях (Stylized-ImageNet) переключает модель на опору по форме и улучшает робастность к ряду искажений, что говорит о текстурной предвзятости CNN и роли цвета в задаче сегментации.

Цвет является мощным дискриминационным признаком для крупных классов SynDrone (Nature, Road), однако для Obstacle цветовые характеристики высоко вариативны. Эти наблюдения обосновывают применение метода RareClassToGrayAugMask: обесцвечивание, применённое избирательно к маскам целевых классов, принуждает сеть опираться на структурные и текстурные признаки в проблемных областях, сохраняя цветовую разделимость доминирующих классов.

Подобная идея частично перекликается с shape-focused augmentation [15], однако реализуется на уровне семантических масок, а не всего изображения.

Дисбаланс классов — одна из наиболее распространённых проблем в задачах сегментации реальных сцен. Авторы в работе [16] систематизируют подходы к обучению на long-tail распределениях в три категории: перебалансировка классов (class re-balancing), информационная аугментация (information augmentation) и улучшение модульной архитектуры. В контексте сегментации первые две категории наиболее практичны: взвешенная функция потерь (Dice Loss, Focal Loss) компенсирует доминирование классов, тогда как таргетные аугментации увеличивают представленность хвостовых категорий в эффективном обучающем сигнале.

Специфика набора данных SynDrone такова, что класс Obstacle (малоразмерные объекты инфраструктуры) занимает менее 2% пикселей при 5-классовой схеме, что порождает выраженный дисбаланс. По данным обзора [16], совместное применение Mosaic-аугментации [17] и взвешенных функций потерь даёт значимые улучшения для хвостовых классов. Предложенный метод дополняет этот подход точечным воздействием на признаковое пространство.

UAV-специфика семантической сегментации городских сцен с БПЛА осложняется наклонной съёмкой, широким диапазоном масштабов объектов и специфическими доменными сдвигами. Набор данных UAVid (300 кадров 4K, 8 классов), показал, что базовые модели достигают ограниченных результатов [18] и требуют архитектур с многоуровневым контекстом [19].

SynDrone, использованный в настоящей работе, охватывает 10 городских доменов при трёх высотах съёмки (20/50/80 м) и обеспечивает контролируемый синтетико-реальный сдвиг [20]. Это позволяет изолированно исследовать влияние аугментации на качество сегментации: синтетические сцены содержат редкие погодные и сезонные комбинации, тогда как реальные кадры несут артефакты сенсора.

Сопоставление с предлагаемым подходом. Существующие работы по аугментации для сегментации решают проблему редких классов либо через глобальные трансформации (MixUp, CutMix, Cutout), либо через вставку объектов (Copy-Paste). Глобальные методы не различают классы по их вкладу в общий сигнал и могут нанести вред цветовой дискриминации доминирующих категорий. Copy-Paste фокусируется исключительно на геометрическом разнообразии, не воздействуя на текстурные и цветовые признаки объектов. Методы борьбы с текстурной предвзятостью [21] применяются глобально и не адаптированы к задаче сегментации с дисбалансом классов.

RareClassToGrayAugMask занимает нишу, отличную от существующих подходов: в отличие от ClassMix, выполняющего class-conditional смешивание регионов двух изображений, предлагаемый метод применяет grayscale-трансформацию избирательно, через деформированную маску семантических классов, сохраняя цветовую разделимость доминирующих классов при повышении инвариантности к цвету у целевых редких категорий. Подход не требует дополнительных размеченных данных, не увеличивает время обучения и совместим с любыми базовыми аугментациями. Применение grayscale-маскирования с деформацией масок для сегментации аэрофотоснимков с БПЛА ранее не исследовалось. Сравнительный анализ методов аугментации приведен в таблице 1.

Несмотря на значительный прогресс в разработке методов расширения данных для задач семантической сегментации, остаётся открытым вопрос о методе, который одновременно: а) воздействует на признаки именно редких классов; б) сохраняет

цветовую разделимость доминирующих категорий; в) не требует дополнительной разметки и совместим с произвольным базовым алгоритмом обучения. RareClassToGrayAugMask направлен на устранение этих недостатков в задаче семантической сегментации аэрофотоснимков с БПЛА.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов аугментации

Метод/ работа	Тип воздействия	Цветокоррекция	Адаптация к классам	Ограничение
Cutout	Маскирование	Нет	Нет	Не различает классы
MixUp	Интерполяция	Да	Нет	Семантические артефакты
CutMix	Вырезание-вставка	Да	Нет	Смещение меток
Copy-Paste	Объектная вставка	Нет	Частично	Только геометрия
Shape-Aug	Стилизация	Да	Нет	Не для сегментации
RareClassToGrayAugMask (предложенный метод)	Обесцвечивание	Да	Да	Требуется знания целевых классов

Набор данных и постановка задачи. В исследовании используется набор данных SynDrone, включающий реальные съёмки городов и соответствующие синтетические сцены. Каждая запись описывается путями к RGB-кадру и семантической маске, аннотациями по углам (yaw/pitch/roll), высоте и доменным признакам (день/ночь, сезон). Итоговые CSV (syndrone_train.csv, syndrone_test.csv) содержат десятки тысяч изображений, которые после преобразования в 5 метакатегорий (Road, Nature, Construction, Obstacle, Water) и добавления индекса 255 для Void подходят для задач пиксельной сегментации.

Главное преимущество SynDrone — контролируемый доменный сдвиг: синтетические сцены покрывают редкие погодные и сезонные комбинации, тогда как реальные кадры отражают шумы сенсора и артефакты аэрофотосъёмки. Используется только домен real, формат входа: RGB-кадр 384×384 пикселей.

Для сегментации аэрофотоснимков с БПЛА необходимо обеспечить устойчивую классификацию геометрически стабильных структур сцены. Полный набор SynDrone включает 105 классов, однако значительная их часть относится к динамическим объектам (транспорт, пешеходы), которые на высотах 50–80 м занимают менее 1% пикселей, обладают нестабильной формой и высокой внутриклассовой вариативностью. Их включение приводит к дисбалансу классов и снижению обобщающей способности модели, что говорит о необходимости выбора ключевых классов.

В качестве ключевых классов выступает система из пяти метаклассов: Road (дорожное покрытие, разметка, тротуары), Nature (растительность, почва, газоны), Construction (здания, стены, крыши, мосты), Obstacle (столбы, знаки, ограничители), Water (водные поверхности). Все прочие категории отнесены к Void (ignore_index=255).

Математическая постановка задачи. Введём формальные обозначения объектов задачи. Пусть задано конечное множество семантических метаклассов $C = \{0, 1, 2, 3, 4\}$, соответствующих категориям Road, Nature, Construction, Obstacle и Water. Обучающая выборка представляет собой множество:

$$\mathbf{D} = (x_i, y_i)_{i=1}^N,$$

где $x_i \in \mathbb{R}^{3 \times H \times W}$ — RGB-кадр аэрофотосъёмки ($H = W = 384$ пикселей); $y_i \in \{0, \dots, 255\}^{H \times W}$ — пиксельная маска разметки, значение 255 соответствует классу Void; $N = 60\,000$ — объём обучающей выборки; $\Omega = \{1, \dots, H\} \times \{1, \dots, W\}$ — множество пикселей кадра.

Модель классификатора. Требуется обучить параметрическое отображение:

$$f_\theta : \mathbb{R}^{3 \times H \times W} \rightarrow [0, 1]^{|\mathcal{C}| \times H \times W},$$

где θ — вектор обучаемых параметров; $|\mathcal{C}| = 5$ — число мета-классов. Для каждого пикселя $p \in \Omega$ выход сети $f_\theta(x)_{:,p} \in [0, 1]^5$ представляет вероятностное распределение по классам (после softmax).

Функция потерь. Параметры θ определяются минимизацией составной функции потерь:

$$L(\theta) = \lambda_{\text{CE}} \cdot L_{\text{CE}}(\theta) + \lambda_{\text{Dice}} \cdot L_{\text{Dice}}(\theta),$$

где $\lambda_{\text{CE}} = \lambda_{\text{Dice}} = 1.0$ — весовые коэффициенты. Кросс-энтропийная составляющая (label smoothing = 0.05, ignore Void):

$$L_{\text{CE}}(\theta) = -\frac{1}{N} \sum_i \iint_{p \in \Omega \setminus \text{Void}} \log f_\theta(x_i)_{y(p),p}.$$

Dice-составляющая балансирует редкие классы по площади пересечения:

$$L_{\text{Dice}}(\theta) = 1 - \frac{2}{|\mathcal{C}|} \int_{c \in \mathcal{C}} \frac{\int_p \hat{y}_{c,p} \cdot y_{c,p}}{\int_p \hat{y}_{c,p} + \int_p y_{c,p} + \varepsilon},$$

где $\hat{y}_{c,p}$ — предсказанная вероятность класса c для пикселя p ; $y_{c,p}$ — бинарная истинная метка; $\varepsilon = 10^{-6}$ — константа численной стабильности.

Метрики качества. Для оценки сегментации используются три метрики. Средняя пересекающаяся площадь (mIoU):

$$\text{mIoU} = \frac{1}{|\mathcal{C}|} \int_{c \in \mathcal{C}} \frac{\text{TP}_c}{\text{TP}_c + \text{FP}_c + \text{FN}_c},$$

средняя точность классов (mAcc):

$$\text{mAcc} = \frac{1}{|\mathcal{C}|} \int_{c \in \mathcal{C}} \frac{\text{TP}_c}{\text{TP}_c + \text{FN}_c},$$

взвешенная по частотам встречаемости IoU (FWIoU):

$$\text{FWIoU} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{c \in \mathcal{C}} \frac{(\text{TP}_c + \text{FN}_c) \cdot \text{TP}_c}{\text{TP}_c + \text{FP}_c + \text{FN}_c},$$

где $\text{TP}_c, \text{FP}_c, \text{FN}_c$ — истинно положительные, ложно положительные и ложно отрицательные пиксели класса c соответственно; $|\Omega| = H \times W$ — общее число пикселей кадра.

Постановка задачи оптимизации. Задача обучения сводится к нахождению оптимального вектора параметров:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} L(\theta),$$

при ограничениях: а) пиксели класса Void ($y_i^p = 255$) исключаются из расчёта потерь; б) обучение ведётся только на реальном домене SynDrone; в) стратегия аугментации

$A(\cdot)$ применяется к входным данным: $\tilde{x}_i = A(x_i, y_i)$. Сравнение конфигураций (таблица 3) проводится по значению mIoU на 10-й эпохе обучения.

Методология. В отличие от классических подходов, где сложность нарастает линейно во времени (позатупные аугментации), предложенный метод реализует точечное усложнение данных для специфических категорий объектов. Все эксперименты используют единый базовый уровень (weak augmentations) с добавлением исследуемого метода поверх него [5].

Предложенный метод RareClassToGrayAugMask. Алгоритм выполняет селективное преобразование пикселей в оттенки серого только в областях, соответствующих маскам заданных семантических классов. Формально метод определяется следующим образом.

Пусть задан входной RGB-кадр $x \in \mathbb{R}^{(3 \times H \times W)}$ и соответствующая пиксельная маска разметки $y \in \{0, \dots, K\}^{(H \times W)}$, где $K = |C| - 1$. Определим подмножество целевых классов $C_{\text{target}} \subset C$, для которых применяется обесцвечивание. На основе маски разметки строится бинарная маска выделения:

$$M(p) = \begin{cases} 1, & \text{если } y(p) \in C_{\text{target}} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

где $p \in \Omega$ — пиксель кадра. Для повышения вариативности обучающих примеров бинарная маска M подвергается случайным геометрическим деформациям (поворот, упругая деформация, перспективное преобразование) с вероятностью $p_{\text{aug}} = 0.5$:

$$\tilde{M} = T(M),$$

где T — композиция случайных геометрических преобразований. Для каждого пикселя p вычисляется значение яркости по стандарту ITU-R BT.601:

$$g(p) = 0,2989 \cdot R(p) + 0,5870 \cdot G(p) + 0,1140 \cdot B(p).$$

Итоговое аугментированное изображение формируется покомпонентным смешиванием исходного кадра и его обесцвеченной версии по деформированной маске:

$$\tilde{x}(p) = \tilde{M}(p) \cdot \begin{bmatrix} g(p) \\ g(p) \\ g(p) \end{bmatrix} + (1 - \tilde{M}(p)) \cdot x(p).$$

Таким образом, в областях целевых классов ($\tilde{M}(p) = 1$) пиксели заменяются на оттенки серого, а в областях доминирующих классов ($\tilde{M}(p) = 0$) исходные RGB-значения сохраняются. Деформация маски $T(M)$ обеспечивает несовпадение границ обесцвечивания с границами сегментации, предотвращая переобучение на артефактах

маски. Метод особенно эффективен для класса *Obstacle*, цветовые характеристики которого высоко вариативны и зависят от условий освещения: принудительная опора на текстурные и структурные признаки повышает робастность модели в этих областях.

Были исследованы механизмы: *CopyPasteFromBank* - инъекция объектов из банка признаков. Исследовались конфигурации $\text{max_objects}=5$ ($p=0.5$) и $\text{max_objects}=10$ ($p=0.8$); *ToGrayRandomLocal* - локальное обесцвечивание случайных регионов; *ToGray (Global)* - глобальное обесцвечивание ($p=0.5$) — контрольная линия для оценки деградации при полной потере цветовой информации. Результаты работы *RareClassToGrayAugMask* показаны на рисунке 1.

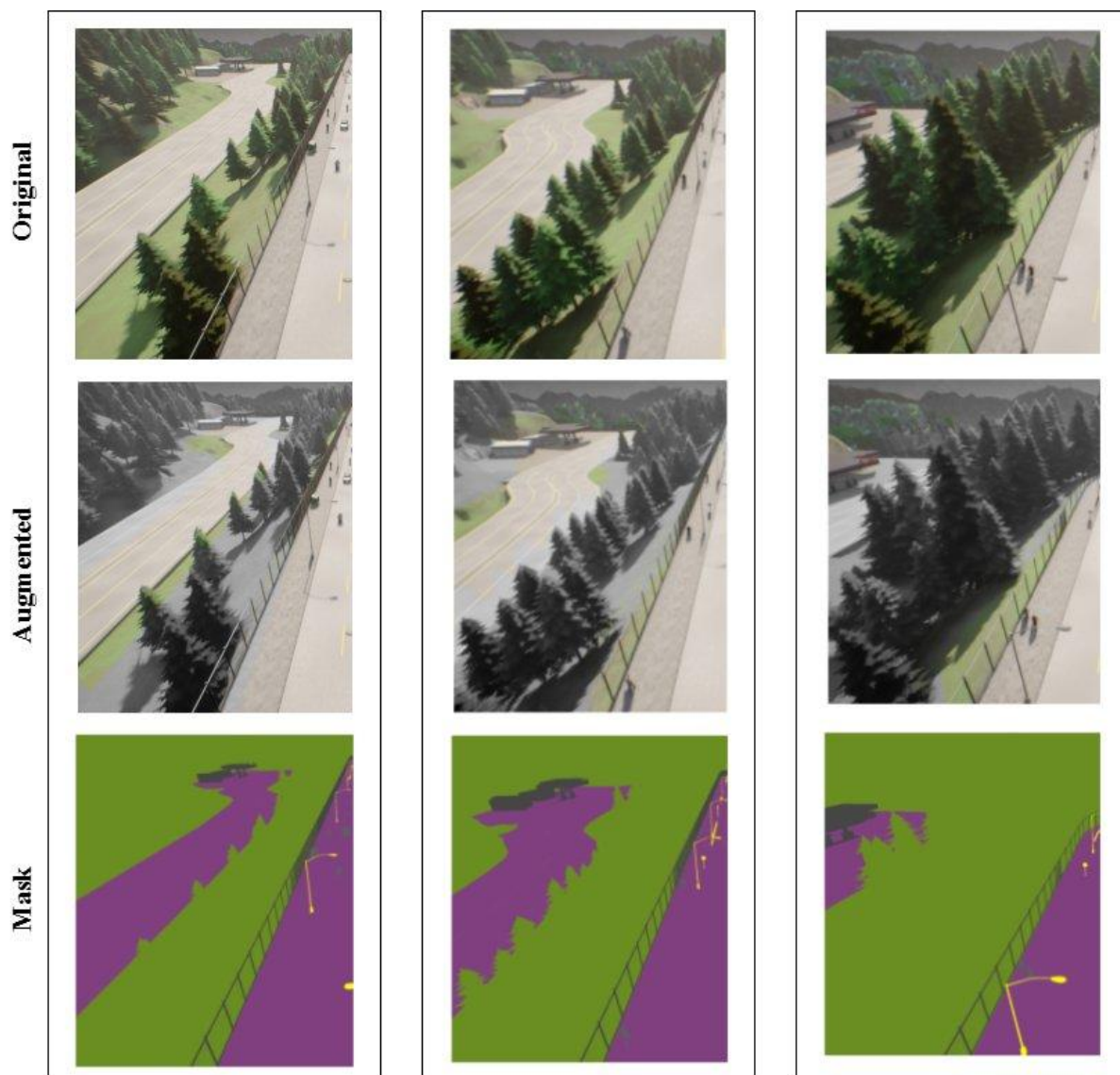


Рис. 1. Наглядная демонстрация работы *RareClassToGrayAugMask*: оригинальные кадры (Original), аугментированные изображения с обесцвеченными областями Nature и Obstacle (Augmented) и соответствующие маски сегментации (Mask)

Пайплайн аугментаций и стратегия обучения представлены авторами в исследовании [5].

Результаты численных экспериментов. Во всех экспериментах использовались идентичные архитектура, гиперпараметры и разбивка данных. Эксперименты

выполнены на видеокарте NVIDIA GeForce RTX 3060 (12 ГБ VRAM) в среде Python 3.11, PyTorch 2.1.0, CUDA 11.8. Обучение одного эксперимента занимало в среднем 3,5 часа (10 эпох, batch size 16). Воспроизводимость обеспечена фиксацией seed = 42.

Модель состоит из трёх компонентов. Энкодер (Backbone) StripNet-Small: используется модуль StripNetExtractor, извлекающий три уровня пирамидальных карт признаков (F_3 , F_4 , F_5); предобученная модель переносится на GPU и обучается в режиме end-to-end. Декодер FPNDecoder [22]: латеральные свёртки 1×1 для выравнивания каналов до 256, top-down суммирование с билинейным апсемплингом, блоки Conv-BN-ReLU для сглаживания признаков. Сегментационная голова: Conv-BN-ReLU $\rightarrow$ Dropout2d ($p=0.1$) $\rightarrow$ Conv2d (1×1), возвращает логиты для 5 метаклассов с масштабированием до 384×384 .

Архитектурные компоненты системы представлены авторами в исследовании [5]. Параметры обучения и гиперпараметры представлены в таблице 2.

Таблица 2. Гиперпараметры обучения

Гиперпараметр	Значение	Обоснование
Оптимизатор	Ranger (RAdam + Lookahead, $\alpha=0.5$, $k=6$)	Комбинирует адаптивный шаг RAdam со стабилизирующим Lookahead
Начальный LR	1×10^{-4}	Стандарт для дообучения предобученного энкодера
Планировщик LR	WarmupReduceLRonPlateau (factor=0.3, patience=1)	Плавный прогрев + снижение при стагнации val-loss
Weight decay	0.01	L2-регуляризация для предотвращения переобучения
β_1 / β_2	0.9 / 0.999	Параметры момента RAdam по умолчанию
Batch size	16	Ограничение VRAM (12 ГБ)
Число эпох	10	Достаточно для сравнительного анализа конфигураций
Смягчение меток	0.05 (label smoothing)	Снижает переуверенность на редких классах
Клиптинг градиентов	1.0	Предотвращает взрыв градиентов
Смешанная точность	AMP fp16 (GradScaler)	Ускорение обучения без потери точности
$\lambda_{CE} / \lambda_{Dice}$	1.0 / 1.0	Равный вес пиксельной точности и регионального подобия

Во всех экспериментах базовые аугментации (Weak Augmentations) включают: HorizontalFlip, Rotate (до 5°), RandomBrightnessContrast, GaussNoise (var 5.0–15.0), GaussianBlur и RandomResizedCrop (scale 0.9–1.0).

Эффективность конфигураций оценивалась по метрике mIoU на 10-й эпохе. Все эксперименты проводились в идентичных условиях: одна архитектура, гиперпараметры, разбивка данных, seed = 42. Целью экспериментов является сравнение стратегий цветового воздействия на обучающие изображения: глобального обесцвечивания, объектной вставки и селективного обесцвечивания по маскам классов. Контрольной конфигурацией служит E0 (Weak only, mIoU = 0.2349) — обучение исключительно с базовыми аугментациями без каких-либо цветовых трансформаций. Глобальное обесцвечивание (E3, mIoU = 0.2361) даёт пренебрежимо малый прирост относительно E0 (+0.0012), что свидетельствует о неэффективности ненаправленного воздействия на цветовое пространство. В то же время селективное обесцвечивание целевых классов (E9, mIoU = 0.3682) обеспечивает прирост +0.1333 относительно E0, демонстрируя, что точечное воздействие на цветовые признаки отдельных классов существенно превосходит как отсутствие цветовых трансформаций, так и их глобальное применение. Сводные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты сравнительных экспериментов по конфигурациям аугментаций

ID	Конфигурация	Ключевые параметры	mIoU
E0	Baseline (Weak only)	Только базовые аугментации	0.2349
E3	Weak + ToGray	p=0.5 (глобально)	0.2361
E7	Weak + CopyPaste	max_objects=5, p=0.5	0.3062
E1	Weak + RareClassToGray	classes=3, p=0.5	0.3067
E4	Weak + ToGray + CopyPaste	combo global gray	0.3070
E2	Weak + RareClassToGray + Local	classes=3, local gray	0.3085
E6	Weak + CopyPaste (Aggressive)	max_objects=10, p=0.8	0.3117
E8	Weak + RareClassToGray (Multi)	classes=0,1,2,4, p=0.5	0.3402
E9	Weak + RareClassToGray (Target)	classes=1, 3, p=0.5	0.3682

Анализ результатов численных экспериментов. Глобальный ToGray (E3) демонстрирует mIoU = 0.2361, что практически не отличается от базовой линии E0 (0.2349, разница +0.0012). Глобальное обесцвечивание не приносит значимого улучшения, поскольку оно одновременно разрушает цветовую информацию, полезную для дискриминации классов Nature и Construction, и лишь частично компенсирует это повышением текстурной инвариантности.

Copy-Paste (E7, E6) показывает умеренно положительный эффект. Увеличение интенсивности вставки объектов в E6 дало прирост +0.0055 относительно E7, однако результаты остаются ниже конфигураций с селективным ToGray.

Селективный ToGray (E1, E8, E9) превосходит все альтернативные конфигурации. Конфигурация E1 (класс 3, Obstacle) незначительно превосходит CopyPaste (E7) при меньшей вычислительной нагрузке, однако разница (+0.0005 mIoU) находится в пределах возможных случайных флуктуаций при одном запуске.

Наивысший показатель в E9 ($mIoU=0.3682$) достигнут за счёт таргетного воздействия на классы Nature (ID 1) и Obstacle (ID 3). Класс Nature является структурным фоновым элементом с большими площадями, тогда как Obstacle — редкие, малоразмерные объекты. Селективное обесцвечивание этих категорий позволило модели выработать робастные инварианты к текстуре, не жертвуя цветовой разделимостью остальных классов. Прирост E9 относительно базовой линии E0 составил +0.1333 $mIoU$, относительно CopyPaste (E7) — +0.0620 $mIoU$, относительно E8 — +0.0280 $mIoU$. Разброс значений между конфигурациями свидетельствует о высокой чувствительности метода к выбору целевых классов.

Для оценки вклада отдельных компонентов проведён анализ конфигураций в порядке возрастания сложности цветового воздействия. Значение $\Delta mIoU$ рассчитано как разница относительно базовой линии E0 (Weak only, $mIoU = 0.2349$) (табл. 4).

Таблица 4. Ablation study: вклад конфигураций аугментации

Конфигурация	Описание	$mIoU$	$\Delta mIoU$
Baseline (Weak only)	Только базовые аугментации	0.2349	—
E3: + ToGray (Global)	Глобальное обесцвечивание, $p=0.5$	0.2361	+0.0012
E7: + CopyPaste (умеренный)	Вставка объектов, $max=5$	0.3062	+0.0713
E1: + RCG, 1 класс	Селективное обесцвечивание, $class=3$	0.3067	+0.0718
E6: + CopyPaste (агрессивный)	Вставка объектов, $max=10$, $p=0.8$	0.3117	+0.0768
E8: + RCG, 4 класса	Многоклассовое обесцвечивание	0.3402	+0.1053
E9: + RCG, 2 класса (Target)	Nature + Obstacle, оптимально	0.3682	+0.1333

Значения $mIoU$ монотонно возрастают при переходе от глобальных к селективным стратегиям. Глобальное обесцвечивание (E3) даёт пренебрежимо малый прирост относительно базовой линии E0 (+0.0012), тогда как CopyPaste (E7) повышает $mIoU$ на +0.0713, а селективное обесцвечивание (E9) — на +0.1333. Переход от одного целевого класса (E1, +0.0718) к двум (E9, +0.1333) свидетельствует о том, что эффект существенно зависит от конкретной комбинации классов. Для строгого подтверждения наличия синергии между Nature и Obstacle необходим дополнительный эксперимент с обесцвечиванием только класса Nature (ID 1), который запланирован в дальнейших исследованиях.

С точки зрения вычислительных затрат все конфигурации RareClassToGrayAugMask добавляют менее 5% к времени предобработки батча (≈ 0.03 с/батч на CPU), тогда как Copy-Paste требует накладных расходов на банк объектов (≈ 0.12 с/батч). Таким образом, E9 обеспечивает наилучшее соотношение качества и вычислительной стоимости.

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают исходную гипотезу: точечное усложнение признакового пространства редких классов является более эффективной стратегией, чем глобальные трансформации. Глобальное обесцвечивание (E3) не приносит значимого улучшения относительно базовой линии E0 (+0.0012 $mIoU$), поскольку разрушение цветовой информации компенсируется лишь незначительным повышением текстурной инвариантности. Вопреки ожиданиям,

конфигурация E8, покрывающая четыре класса, уступила E9 с двумя классами (Nature + Obstacle). Вероятное объяснение состоит в том, что обесцвечивание классов Road и Construction разрушает полезные цветовые градиенты на границах этих категорий, тогда как Nature и Obstacle обладают достаточной текстурной вариативностью, чтобы компенсировать потерю цвета.

Метод RareClassToGrayAugMask требует предварительного знания целевых классов, что ограничивает его применимость без предварительного анализа набора данных. Эксперименты проводились на 10 эпохах с одним фиксированным seed, что не позволяет оценить долгосрочную динамику обучения и статистическую устойчивость результатов. Оценка проводилась только по метрике mIoU; покласовый анализ IoU и анализ сходимости требуют отдельного исследования.

Ближайшей задачей является автоматический выбор целевых классов для обесцвечивания. Текущий подход требует ручного подбора, однако статистика дисбаланса набора данных (частотность пикселей по классам, дисперсия цветовых признаков) может служить основой для автоматического ранжирования классов-кандидатов. Следующим шагом станет адаптивное управление вероятностью p применения маски: вместо фиксированного значения $p = 0.5$ вероятность может корректироваться в ходе обучения в зависимости от текущего IoU целевого класса, усиливая воздействие на отстающие категории и ослабляя его по мере улучшения. В перспективе планируется исследование взаимодействия RareClassToGrayAugMask с поэтапными (curriculum) стратегиями из [5], где слабые аугментации постепенно заменяются сильными: селективное обесцвечивание может выступать промежуточным уровнем сложности между базовыми и агрессивными трансформациями. Наконец, увеличение числа эпох обучения и включение синтетического домена SynDrone позволит оценить долгосрочную сходимость и устойчивость метода при доменном сдвиге между синтетическими и реальными данными.

Выводы. Восемь сравнительных экспериментов на реальном домене SynDrone подтвердили гипотезу о превосходстве селективного обесцвечивания над глобальными цветовыми трансформациями. Конфигурация E9 (Nature + Obstacle) достигла наивысшего mIoU среди всех исследованных стратегий, существенно превзойдя как Copy-Paste, так и глобальное обесцвечивание, которое не дало значимого прироста относительно базовой линии. Селективное воздействие на цветовые признаки отдельных классов сохраняет дискриминацию доминирующих категорий при повышении робастности модели к текстурным вариациям редких объектов. Выявленная чувствительность метода к выбору целевых классов указывает на перспективность автоматического подбора этих классов на основе статистики дисбаланса набора данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation / L.-C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11211. – P. 801-818.
2. Зуев, В. М. Сравнение обнаружения объектов средствами искусственного интеллекта в сравнении с классическими методами / В. М. Зуев // Проблемы искусственного интеллекта. – 2024. – Т. 34, № 3. – С. 4-10.
3. SynDrone – Multi-modal UAV Dataset for Urban Scenarios / G. Rizzoli, F. Barbato, M. Caligiuri [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2023. – P. 2236-2246.

4. Пикалёв, Я. С. Обнаружение ключевых объектов и перекрёстная геолокализация: анализ наборов данных и методологические перспективы / Я. С. Пикалёв // Проблемы искусственного интеллекта. – 2024. – № 4 (35). – С. 25-37. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-25-37.
5. Устенко, В. Ю. Методика расширения данных для сегментации ключевых объектов на аэрофотоснимках БПЛА / В. Ю. Устенко, М. В. Близно // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 4 (39). – С. 84-97. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-84-97.
6. Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey / S. Minaee, Y. Boykov, F. Porikli [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – Vol. 44, no. 7. – P. 3523-3542.
7. Shorten, C. A Survey on Image Data Augmentation for Deep Learning / C. Shorten, T. M. Khoshgoftaar // Journal of Big Data. – 2019. – Vol. 6, No. 1. – Art. 60.
8. DeVries, T. Improved Regularization of Convolutional Neural Networks with Cutout / T. DeVries, G. W. Taylor // arXiv preprint. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1708.04552>.
9. Masked Autoencoders Are Scalable Vision Learners / K. He, X. Chen, S. Xie [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2022. – P. 16000-16009.
10. Choi, J. Colorful Cutout: Enhancing Image Data Augmentation with Curriculum Learning / J. Choi, Y. Kim // arXiv preprint. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2403.20012>.
11. Mixup: Beyond empirical risk minimization/ H. Zhang, M. Cisse, Y. N. Dauphin [et al.] // arXiv preprint. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1710.09412>.
12. CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers with Localizable Features / S. Yun, D. Han, S. Chun [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019. – P. 6023-6032.
13. Simple Copy-Paste is a Strong Data Augmentation Method for Instance Segmentation / G. Ghiasi, Y. Cui, A. Srinivas [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2021. – P. 2917-2928.
14. ImageNet-trained CNNs are biased towards textures; increasing shape bias improves accuracy and robustness / R. Geirhos, P. Rubisch, C. Michaelis [et al.] // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). – 2019. – 22 p.
15. Lee, J. Improving Robustness to Texture Bias via Shape-Focused Augmentation / J. Lee, S. Kim, S. Kim [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). – 2022. – P. 4323-4331.
16. Deep Long-Tailed Learning: A Survey / Y. Zhang, B. Kang, B. Hooi [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2023. – Vol. 45, No. 9. – P. 10795-10816.
17. CP2M: Clustered-Patch-Mixed Mosaic Augmentation for Aerial Image Segmentation / Y. Li [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2501.15389>.
18. UAVid: A Semantic Segmentation Dataset for UAV Imagery / Y. Lyu, G. Vosselman, G.-S. Xia [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – Vol. 165. – P. 108-119. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.009.
19. Pyramid Scene Parsing Network / H. Zhao, J. Shi, X. Qi [et al.] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 6230-6239.
20. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge / M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams [et al.] // International Journal of Computer Vision. – 2010. – Vol. 88, No. 2. – P. 303-338.
21. Hermann, K. L. The Origins and Prevalence of Texture Bias in Convolutional Neural Networks / K. L. Hermann, T. Chen, S. Kornblith // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2020. – Vol. 33. – P. 19000-19015.
22. Feature Pyramid Networks for Object Detection / T.-Y. Lin, P. Dollar, R. Girshick [et al.] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 936-944.

REFERENCES LIST

1. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation / L.-C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11211. – P. 801-818.
2. Zuev, V. M. Sravnenie obnaruzheniia obiektov sredstvami iskusstvennogo intellekta v sravnenii s klassicheskimi metodami / V. M. Zuev // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2024. – T. 34, № 3. – S. 4-10.
3. SynDrone – Multi-modal UAV Dataset for Urban Scenarios / G. Rizzoli, F. Barbato, M. Caligiuri [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2023. – P. 2236-2246.

4. Pikalev, Ia. S. Obnaruzhenie kluchevykh obiektov i perekrestnaia geolokalizatsiia: analiz naborov dannykh i metodologicheskie perspektivy / Ia. S. Pikalev // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2024. – № 4 (35). – S. 25-37. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-25-37.
5. Ustenko, V. Iu. Metodika rasshireniia dannykh dlia segmentatsii kluchevykh obiektov na aerofotosnimkakh BPLA / V. Iu. Ustenko, M. V. Blizno // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2025. – № 4 (39). – S. 84-97. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-84-97.
6. Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey / S. Minaee, Y. Boykov, F. Porikli [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – Vol. 44, no. 7. – P. 3523-3542.
7. Shorten, C. A Survey on Image Data Augmentation for Deep Learning / C. Shorten, T. M. Khoshgoftaar // Journal of Big Data. – 2019. – Vol. 6, No. 1. – Art. 60.
8. DeVries, T. Improved Regularization of Convolutional Neural Networks with Cutout / T. DeVries, G. W. Taylor // arXiv preprint. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1708.04552>.
9. Masked Autoencoders Are Scalable Vision Learners / K. He, X. Chen, S. Xie [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2022. – P. 16000-16009.
10. Choi, J. Colorful Cutout: Enhancing Image Data Augmentation with Curriculum Learning / J. Choi, Y. Kim // arXiv preprint. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2403.20012>.
11. Mixup: Beyond empirical risk minimization/ H. Zhang, M. Cisse, Y. N. Dauphin [et al.] // arXiv preprint. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1710.09412>.
12. CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers with Localizable Features / S. Yun, D. Han, S. Chun [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019. – P. 6023-6032.
13. Simple Copy-Paste is a Strong Data Augmentation Method for Instance Segmentation / G. Ghiasi, Y. Cui, A. Srinivas [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2021. – P. 2917-2928.
14. ImageNet-trained CNNs are biased towards textures; increasing shape bias improves accuracy and robustness / R. Geirhos, P. Rubisch, C. Michaelis [et al.] // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). – 2019. – 22 p.
15. Lee, J. Improving Robustness to Texture Bias via Shape-Focused Augmentation / J. Lee, S. Kim, S. Kim [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). – 2022. – P. 4323-4331.
16. Deep Long-Tailed Learning: A Survey / Y. Zhang, B. Kang, B. Hooi [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2023. – Vol. 45, No. 9. – P. 10795-10816.
17. CP2M: Clustered-Patch-Mixed Mosaic Augmentation for Aerial Image Segmentation / Y. Li [et al.] // arXiv preprint. – 2025. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2501.15389>.
18. UAVid: A Semantic Segmentation Dataset for UAV Imagery / Y. Lyu, G. Vosselman, G.-S. Xia [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – Vol. 165. – P. 108-119. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.009.
19. Pyramid Scene Parsing Network / H. Zhao, J. Shi, X. Qi [et al.] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 6230-6239.
20. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge / M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams [et al.] // International Journal of Computer Vision. – 2010. – Vol. 88, No. 2. – P. 303-338.
21. Hermann, K. L. The Origins and Prevalence of Texture Bias in Convolutional Neural Networks / K. L. Hermann, T. Chen, S. Kornblith // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2020. – Vol. 33. – P. 19000-19015.
22. Feature Pyramid Networks for Object Detection / T.-Y. Lin, P. Dollar, R. Girshick [et al.] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 936-944.

Поступила в редакцию 03.04.2026 г., рекомендована к изданию 17.04.2026 г.

STUDY OF SELECTIVE AUGMENTATION STRATEGIES FOR SEMANTIC SEGMENTATION OF
UAV AERIAL IMAGERY

Ustenko V.IU., Pikalev IA.S.

Semantic segmentation of aerial images captured by unmanned aerial vehicles (UAVs) is used for urban infrastructure monitoring. Class imbalance remains an unresolved problem during training: small-sized infrastructure objects occupy less than two percent of the scene pixels, resulting in insufficient segmentation accuracy for these categories. Existing data augmentation methods address this problem with reasonable effectiveness. The RareClassToGrayAugMask method, proposed in this paper, performs selective desaturation of pixels only within the masks of designated semantic classes and additionally distorts the desaturation region, which improves robustness and model invariance to color in the areas of rare objects.

Keywords: semantic segmentation, StripNet, FPN, SynDrone, UAV, aerial imagery, selective augmentation, RareClassToGrayAugMask, Copy-Paste.

Пикалёв Ярослав Сергеевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией интеллектуальных систем и анализа данных ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i@pikaliov.ru

Pikalev IAroslav Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Intelligent Systems and Data Analysis of Institute of Artificial Intelligence Problems,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6059-3229>

Устенко Владимир Юрьевич

аспирант, младший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем и анализа данных ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ustencko.vova@ya.ru

Ustenko Vladimir IUrevich

Postgraduate Student, Junior Researcher at Laboratory of Intelligent Systems and Data Analysis of Institute of Artificial Intelligence Problems,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0354-9618>

Э Н Е Р Г Е Т И К А И Э Л Е К Т Р О Т Е Х Н И К А

EDN LWAJCB
УДК 536.24:532.5:621.592

DOI 10.5281/zenodo.20800050

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В АППАРАТАХ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© 2026 *Захаров А.С., Аетов А.У., Саяхов Р.Х., Гильмутдинов И.М.*

В данной работе исследован процесс охлаждения в аппаратах воздушного охлаждения природного газа (АВОг). Разработана программа инструментального обследования, которая представляет собой доработки ранее существующей программы оценки эффективности. Объектом исследования явилась установка охлаждения газа, состоящая из 16 АВОг образца «2АВГ-75», расположенных на компрессорной станции «Арская», ООО «Газпром Трансгаз Казань». На основе технической документации, анкетирования персонала и анализа данных из программы инструментального обследования проведено моделирование процесса охлаждения природного газа. Приведено математическое моделирование, которое позволяет глубже понять механизмы, влияющие на процесс охлаждения природного газа. Полученные результаты направлены на оптимизацию процесса охлаждения и на повышение эффективности работы компрессорных станций.

Ключевые слова: аппараты воздушного охлаждения, теплопередача природный газ, моделирование, солнечное излучение, компрессорная станция.

Введение. Аппарат воздушного охлаждения газа представляет собой специализированный теплообменный агрегат, предназначенный для эффективного охлаждения газовых технологических потоков. Эти устройства, как правило, устанавливаются на открытых технологических площадках, что обуславливает их устойчивость к внешним условиям. Конструкция АВОг включает в себя теплообменные секции с оребрѐнными трубками, вентиляторы, аэродинамические элементы, которые размещены на прочных несущих конструкциях, а также сами несущие конструкции с площадками обслуживания. Важно отметить, что несколько АВОг объединяются в единую установку охлаждения газа, что позволяет оптимизировать процесс охлаждения и повысить общую эффективность работы системы [1-3]. Однако в процессе эксплуатации АВОг могут возникать ряд технических проблем, которые негативно сказываются на их производительности. Одной из наиболее распространѐнных проблем является значительное потребление электроэнергии мотор-вентиляторами, которое часто не оправдывается эффективностью понижения температуры газа. Параллельно с этим может наблюдаться снижение эффективности теплообмена, вызванное загрязнением или повреждениями в теплообменной секции (ТС) [4, 5]. Эти факторы могут приводить к увеличению эксплуатационных затрат и снижению общей надежности системы. Так же внешние факторы играют значительную роль в работе аппаратов воздушного охлаждения газа (АВОг) и могут существенно влиять на их эффективность и производительность. Одним из наиболее значимых факторов является температура окружающей среды, которая может варьироваться в зависимости от времени года и географического положения. При высоких температурах окружающего воздуха эффективность теплообмена в АВОг снижается, так как разница температур между охлаждаемым газом и окружающей средой становится менее выраженной [6].

Данный фактор способен привести к росту энергопотребления вентиляторов, поскольку для обеспечения заданного уровня охлаждения требуются дополнительные затраты мощности. Существенное влияние оказывает солнечное излучение: нагрев поверхности теплообменных секций ухудшает теплообмен как за счёт повышения температуры воздуха, так и вследствие прямого радиационного воздействия на конструкции АВОг. Это затрудняет поддержание оптимального температурного режима и снижает производительность. Своевременное инструментальное обследование позволяет выявить указанные проблемы и разработать меры по повышению эффективности установки охлаждения газа (УОГ), что не только оптимизирует её работу и увеличивает ресурс, но и сокращает эксплуатационные затраты. Регулярные обследования и анализ состояния АВОг являются основой для внедрения современных технологий и систем мониторинга. Это позволяет повысить эффективность работы компрессорных станций, улучшить эксплуатационные характеристики оборудования и обеспечить надежное управление процессами, что в конечном итоге приводит к снижению затрат и росту производительности.

Экспериментальная часть. Результаты инструментального обследования (ИО) показали, что в течение года аппараты воздушного охлаждения газа функционируют преимущественно на основе принципа свободной конвекции. Это означает, что в большинстве случаев они способны эффективно работать без активного участия вентиляторов. Включение вентиляторов становится необходимым только в тех ситуациях, когда температура газа превышает установленный порог в 35,5 °С. Такой режим работы имеет важные последствия для методики расчета эффективности АВОг в соответствии со стандартами, установленными в ООО «Газпром Трансгаз Казань» [7]. Поскольку в условиях свободной конвекции отсутствует потребление электроэнергии, эффективность системы стремится к бесконечному значению, что может ввести в заблуждение при оценке ее реальных эксплуатационных характеристик. Более того, этот режим работы оказывает значительное влияние на процесс охлаждения природного газа, особенно в теплое время года, когда высокие температуры окружающей среды могут существенно повлиять на общую производительность системы. Дополнительно, в ходе замеров с использованием тепловизора «DT-9868», с пределом допустимой основной абсолютной погрешности измерения температур в пределах $\pm 2\%$, было выявлено неравномерное распределение температур на теплообменных секциях (ТС) АВОг. Это неравномерное распределение наблюдается как в верхней, так и в нижней части теплообменников, что может указывать на наличие проблем в процессе теплообмена и, как следствие, на снижение общей эффективности работы системы. Такие данные подчеркивают важность регулярного мониторинга температурных режимов и выявления потенциальных проблем, которые могут негативно сказаться на производительности АВОг. Результаты обследования представлены в таблицах 1-3, а на рисунке 1 представлено визуальное отображение полученных результатов, что позволяет более наглядно оценить распределение температур и выявить участки, требующие дополнительного внимания.

Таблица 1. Показатели окружающей среды

№ п/п	Наименование	Значение параметра	Ед. измерения
1	Освещённость	12 243	Лк
2	Барометрическое давление, P_a	98,93	кПа
3	Температура воздуха, t_a	26	°С
4	Относительная влажность воздуха	26,5	%

Таблица 2. Показатели работы УОГ

№ п/п	Наименование	Значение параметра	Ед. измерения
1	Давление газа на входе в АВО, P_{1ABO}	7070	кПа
2	Потеря давления газа в АВО ¹ , ΔP_{ABO}	-	кПа
3	Температура газа на входе в АВО, t_{1ABO}	32,2	°С
4	Температура газа на выходе из АВО, t_{2ABO}	30,2	°С
5	Мощность вентиляторов АВО ² , N_{ABO}	-	кВт
6	Давление газа на входе в УОГ, $P_{1УОГ}$	7070	кПа
7	Потеря давления газа в УОГ, $\Delta P_{УОГ}$	33	кПа
8	Температура газа на входе в УОГ, $t_{1УОГ}$	33	°С
9	Температура газа на выходе из УОГ, $t_{2УОГ}$	30,4	°С
10	Суммарная мощность вентиляторов УОГ, $N_{УОГ}$	0	кВт

¹- не удалось замерить давление непосредственно на выходе из АВОг, поскольку отсутствовал выходной манометр (КИП) на секции.

²-мощность, затрачиваемая вентиляторами = 0 кВт, т.к. УОГ работает в режиме естественной конвекции.

Таблица 3. Замеры параметров охлаждающего воздуха

Расстояние от края, м	Скорость воздуха, м/с	Температура, °С
1,3	0 – 0,4	27,3
2,6		28,0
3,9		28,8
5,2		29,4
6,5		30,6
7,8		31,0
9,1		31,3
10,4		31,2
11,7		31,2

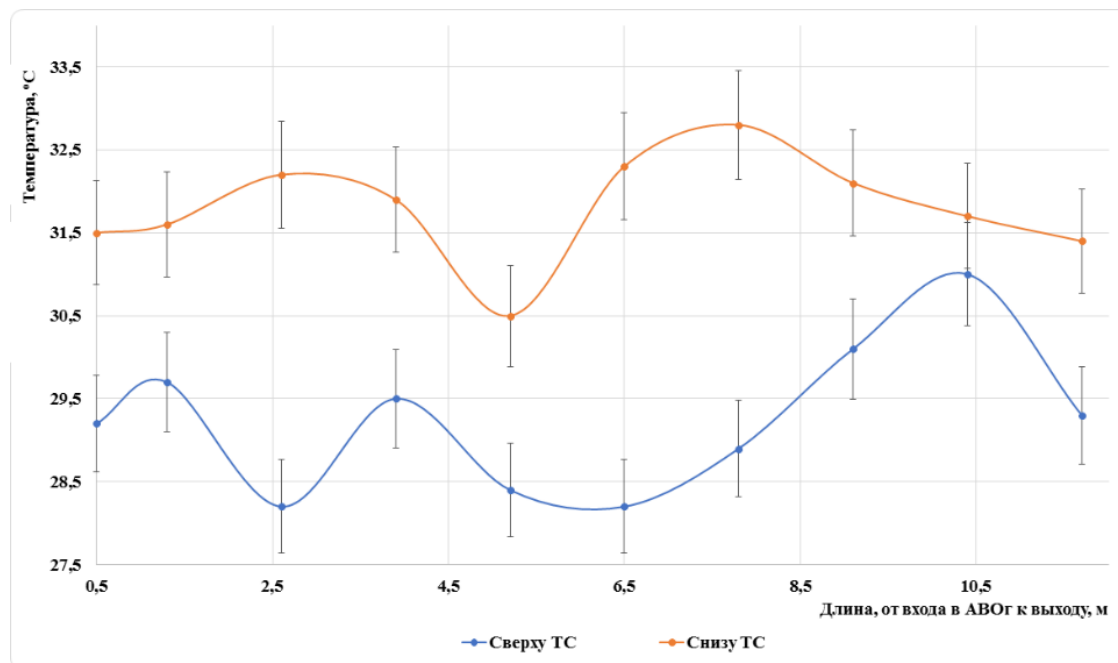


Рис. 1. Распределение (фактическое) температуры в ТС по результатам замеров, °С

Неравномерное распределение температуры на поверхности теплообменных секций (ТС) АВОг, наблюдаемое на термограмме, обусловлено комплексом физических явлений [8]. При отсутствии принудительной тяги движение воздуха определяется

естественной конвекцией, интенсивность которой зависит от локального перепада температур, что приводит к формированию нестационарных конвективных ячеек и неравномерному обдуву. Биметаллические оребренные трубки создают сложное трёхмерное температурное поле с градиентом от основания к вершине ребра. Кроме того, первые ряды трубок в пучке экранируют последующие, ухудшая теплообмен. Дополнительный вклад вносит сверхкритическое состояние природного газа, изменяющее его теплофизические свойства, и турбулентное течение внутри трубки, при котором коэффициент теплоотдачи максимален в зонах развитой турбулентности и минимален в зонах ламинаризации [9]. Предполагается, что вклад в работу аппарата также вносит тепло, получаемое от солнца, особенно в летний период эксплуатации. Для более глубокого понимания этого влияния была смоделирована ситуация с использованием программного обеспечения для вычислительной гидродинамики (CFD, Computational Fluid Dynamics), в которой анализировалось охлаждение оребренной трубки как с учетом, так и без учета тепла, получаемого от солнечных лучей. Этот подход позволяет оценить, насколько солнечное излучение может влиять на эффективность работы аппаратов воздушного охлаждения газа.

Постановка CFD-задачи (системы уравнений). Программа для моделирования основывается на основных физических законах, включая законы сохранения массы, импульса и энергии, а также уравнения состояния, которые описывают поведение газа и теплообмен. Важным аспектом моделирования является передача тепла от солнечных лучей, которая может значительно изменить тепловые режимы в системе.

Уравнение сохранения массы в случае газа, который может изменять свою плотность (например, в высокоскоростных потоках), записывается в форме [10]:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

где $\nabla \cdot (\rho \vec{V})$ – дивергенция потока массы, которая учитывает как изменение плотности, так и скорость потока.

Общая форма уравнений Навье-Стокса для описания динамики жидкости или газа, учитывающая вязкость и внешние силы (уравнение сохранения импульса), записывается следующим образом [10]:

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{f}, \quad (2)$$

где $\vec{V} = (u, v, w)$ – вектор скорости жидкости, где u, v, w – компоненты вектора скорости газа по осям x, y, z соответственно (м/с); p – давление, МПа; ρ – плотность жидкости или газа, кг/м³; ν – кинематическая вязкость, м²/с; $\vec{f} = (f_x, f_y, f_z)$ – вектор внешних сил (например, силы тяжести); ∇ – оператор набла; ∇^2 – оператор Лапласа.

Поскольку моделирование проходит в формате 3d то по каждой координате данное уравнение можно расписать в виде:

уравнение для компоненты u (по оси x):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x, \quad (3)$$

уравнение для компоненты v (по оси y):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_y, \quad (4)$$

уравнение для компоненты w (по оси z):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_z. \quad (5)$$

Так же для моделирования теплообмена программа использует уравнение сохранения энергии и теплопроводности, которые описывают, как температура изменяется во времени и пространстве.

Уравнение сохранения энергии (для теплопередачи) может быть записано в следующем виде [11]:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} E) = -\nabla \cdot \vec{q}, \quad (6)$$

где E – полная энергия на единицу массы (включает внутреннюю, кинетическую и потенциальную энергию), Дж/кг; $\vec{q}$ – вектор плотности теплового потока.

Уравнение теплопроводности [12]:

$$\lambda \nabla^2 T + Q = 0, \quad (7)$$

где T – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q – источник тепла (например, внешнее или внутреннее тепло), Дж. В данной работе внутренние источники тепла отсутствуют ($Q = 0$), а внешнее тепловое воздействие (например, солнечное излучение) учитывается через граничные условия на поверхности трубок и оребрения, как описано ниже (8) для плотности теплового потока $q_{\text{солн}}$.

Воздействие солнечной радиации на оребренные трубки учитывается как граничное условие на внешней поверхности. В ANSYS Fluent для этого используется модель солнечного излучения (Solar Load Model) в режиме трассировки лучей (Solar Ray Tracing) [10]. Данная модель автоматически определяет освещённые грани, вычисляет угол падения лучей и затенение от соседних трубок.

$$q_{\text{солн}} = \alpha \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \delta, \quad (8)$$

где $q_{\text{солн}}$ – плотность поглощённого теплового потока (Вт/м²); α – коэффициент поглощения поверхности (для алюминия принимается $\alpha = 0,2$) [13]; I – интенсивность прямого солнечного излучения (в расчётах $I = 1000$ Вт/м²); φ – угол между направлением солнечных лучей и нормалью к поверхности (при вертикальном падении лучей $\cos \varphi = 1$); δ – коэффициент затенения ($\delta = 1$ для освещённых участков, $\delta = 0$ для затенённых).

Уравнения (1–6) составляют систему уравнений сохранения, которая решалась численно в ANSYS Fluent методом конечных объёмов (Finite Volume Method); соотношения (7–8) приведены для постановки теплопереноса в твёрдом теле и задания внешнего теплового воздействия (солнечной радиации) на наружной поверхности оребрения. В ANSYS Fluent солнечная радиация задавалась как поверхностный тепловой поток посредством модели Solar Load (ray tracing). Для учета отклонения природного газа от идеального поведения при повышенных давлениях в CFD-модели используется уравнение состояния реального газа в форме коэффициента (фактора)

сжимаемости z . Вириальное уравнение состояния для реальных газов может быть записано в виде разложения для z [14]:

$$z = \frac{pV_m}{RT} = 1 + \frac{B(T)}{V_m} + \frac{C(T)}{V_m^2} + \dots, \quad (9)$$

где $V_m = V / n$ – молярный объём, м³/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; $B(T)$ и $C(T)$ – второй и третий вириальные коэффициенты соответственно (функции температуры), имеющие размерности B : м³/моль и C : м⁶/моль².

$$\rho = \frac{p}{zRT}. \quad (10)$$

При рабочих параметрах ($t \approx 33^\circ\text{C}$ и $p \approx 7.03$ МПа) природный газ находится в области плотного однофазного газа (в инженерной практике часто относимой к сверхкритической/псевдосверхкритической области), где отклонение от идеального закона существенно ($z \neq 1$). В этой области применение вириального уравнения состояния реального газа предпочтительно, поскольку корректное описание $\rho(p, T)$ напрямую влияет на решение уравнений сохранения массы, импульса и энергии в CFD.

В настоящей работе учёт уравнения состояния использовался в CFD-модели (ANSYS Fluent) для расчёта плотности $\rho(p, T)$ по локальным значениям p и T и, соответственно, для замыкания уравнений сжимаемого течения. Реализация выполнена через пользовательскую функцию (UDF – user defined function) (тип DEFINE_PROPERTY) в Fluent, которая вычисляет z по уравнению (9) с использованием известных справочных данных для вириальных коэффициентов $B(T)$ и $C(T)$ [15], и далее определяет плотность по (10). В инженерной методике расчёта температурного профиля уравнение состояния не вводится явно; необходимые теплофизические свойства подставляются из табличных данных при заданных рабочих p , T что соответствует неявному учёту неидеальности через свойства. Таким образом, применение вириальной формы уравнения состояния в CFD-постановке обусловлено необходимостью корректно задавать плотность реального газа как функцию локальных p и T при высоких давлениях (область плотного однофазного газа).

Моделирование в программе ANSYS Fluent. Исходная геометрия для моделирования это биметаллическая, оребрённая трубка как показано на рисунке 3, которая состоит из стальной несущей трубы и алюминиевого оребрения, а на рисунке 4 граничные условия биметаллической оребрённой трубки.

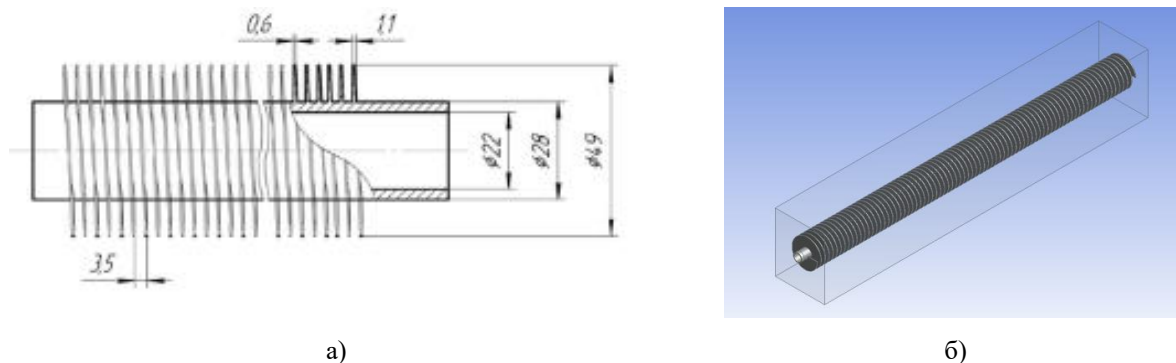


Рис. 3. Вид биметаллической оребрённой трубки АВОг: а) схема; б) в среде CFD

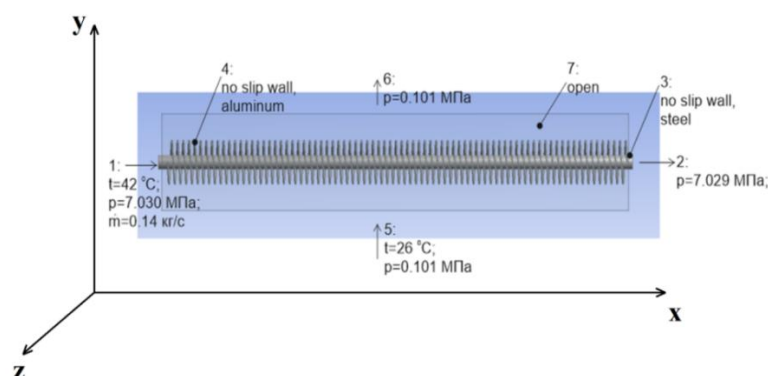


Рис. 4. Расстановка граничных условий биметаллической оребрѐнной трубки АВОг:

1 – вход газа; 2 – выход газа; 3 – стенка трубки; 4 – оребрение; 5 – вход воздуха; 6 – выход воздуха; 7 – боковые стенки модели

Геометрическая модель состоит из стальной трубки с внутренним диаметром 22 мм и толщиной стенки 3 мм, алюминиевого оребрения с высотой ребра 21 мм и толщиной 2 мм, цилиндрического тела внутри этой трубки для моделирования течения газа в ней и параллелепипеда для моделирования обдува этой трубки. В таблице 4 приведены граничные условия моделирования.

Таблица 4. Обозначение граничных условий

1. Вход газа		4. Оребрение	
Тип	Mass flow inlet	Тип	wall (no slip wall)
t , °C	42	Материал	алюминий
p , МПа	7,03	5. Вход воздуха	
Массовый расход, кг/с	0,14	Тип	Velocity inlet
2. Выход газа		Скорость воздуха, м/с	0,4
Тип:	Pressure outlet	t , °C	26
p , МПа	7, 029	$p = p_{\text{атм}}$, МПа	0,101
3. Стенка трубки		6. Выход воздуха	
Тип	wall (no slip wall)	Тип	Pressure outlet
Материал	сталь	$p = p_{\text{атм}}$, МПа	0,101
7. Боковые стенки модели			
Тип		Open	
8. Настройки решателя и физические модели			
Режим расчёта		стационарный (steady)	
Решатель		Pressure-based; Energy = ON	
Модель турбулентности (газ)		RANS $k\text{-}\varepsilon$ (Realizable); стандартные пристенные функции	
Сила тяжести		учтена ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$)	
Солнечная радиация		Solar Load (ray tracing), $I = 1000 \text{ Вт/м}^2$, α задан по материалу поверхности	
Критерий сходимости		остатки (residuals) $\leq 10^{-6}$, контроль по температуры на выходе	
Связка давление – скорость		SIMPLE	
Дискретизация		Second Order Upwind (momentum/energy)	
Сопряжённый теплообмен		учитывается теплопроводность: в стали и Al + конвекция; в природном газе и воздухе; контакт сталь – Al принят идеальным	
Уравнение состояния / свойства реального газа		Интерполяция по локальным p , T выполняется решателем по (9) и (10); реализовано через UDF (DEFINE_PROPERTY)	

Моделирование солнечных лучей. Для моделирования излучения был задан поток солнечной радиации, воспринимаемый телами [16-19], значением в 1000 Вт/м^2 с верхней поверхности параллелепипеда (выражение 8). Расчётная сетка состоит из 1 055 362 тетраэдральных ячеек и 964 741 узлов. Вышеперечисленные исходные данные смасштабированы под трубку длиной 12 м. И по результатам выполнения данных расчётов были получены следующие данные. На рисунке 5 представлены визуализация охлаждения газа без учёта солнечного излучения (рис. 5а) и график изменения температуры газа без учёта солнечного излучения (рис. 5б), а на рисунке 6 с учётом солнечного излучения.

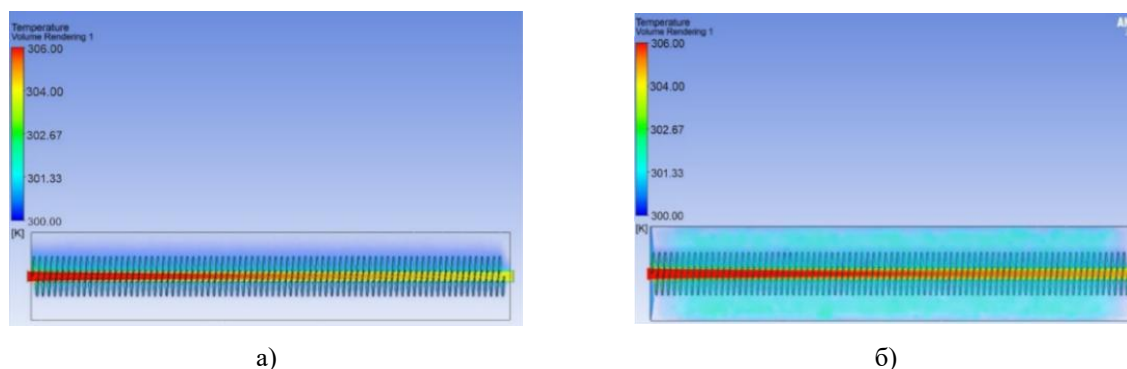


Рис. 5. Температурные поля по итогам моделирования: а) без учёта внешних воздействий; б) с учётом

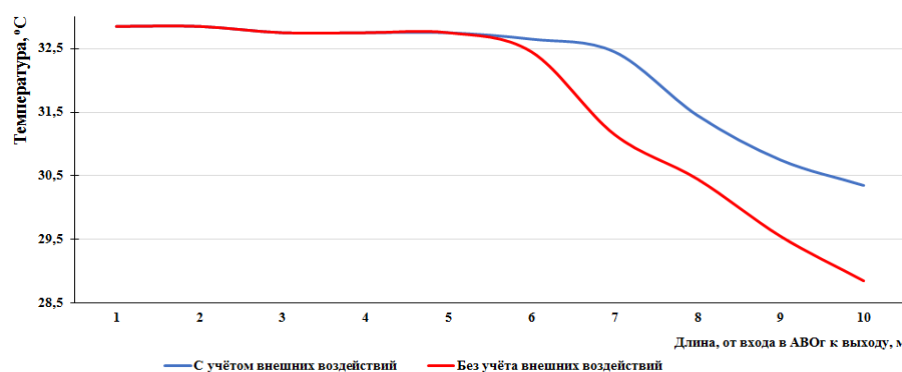


Рис. 6. График температур ядра потока газа по длине трубки по итогам моделирования: с учётом и без учёта внешних воздействий

Как видно из рис. 5б и рис. 6, проведённое моделирование показало, что учёт солнечной радиации приводит к заметному уменьшению температурного напора между охлаждаемым газом и окружающим воздухом на начальном участке аппарата. Нагрев внешней поверхности оребрения солнечным излучением снижает интенсивность охлаждения вблизи входа и смещает точку начала выраженного (интенсивного) снижения температуры газа с 0,275 м (без учёта солнца) до 0,475 м (с учётом солнца) в координатах масштабированной расчётной трубки, принятой в CFD-модели. Полученные результаты наглядно демонстрируют, что пренебрежение солнечной радиацией в инженерных расчётах может приводить к существенной погрешности при прогнозировании тепловых режимов АВОг, особенно в условиях преобладания свободной конвекции, что указывает на необходимость учёта внешних тепловых воздействий при проектных и поверочных расчётах. Комплексный подход, сочетающий аналитические методы с численным экспериментом, позволяет получить более достоверные данные для оптимизации конструкций АВОг и режимов их эксплуатации.

Верификация CFD по температуре стенки. На рис. 7 представлено сравнение температурного профиля стенки верхней трубы по длине секции, полученного по экспериментальным измерениям, и результатов CFD-моделирования в ANSYS Fluent.

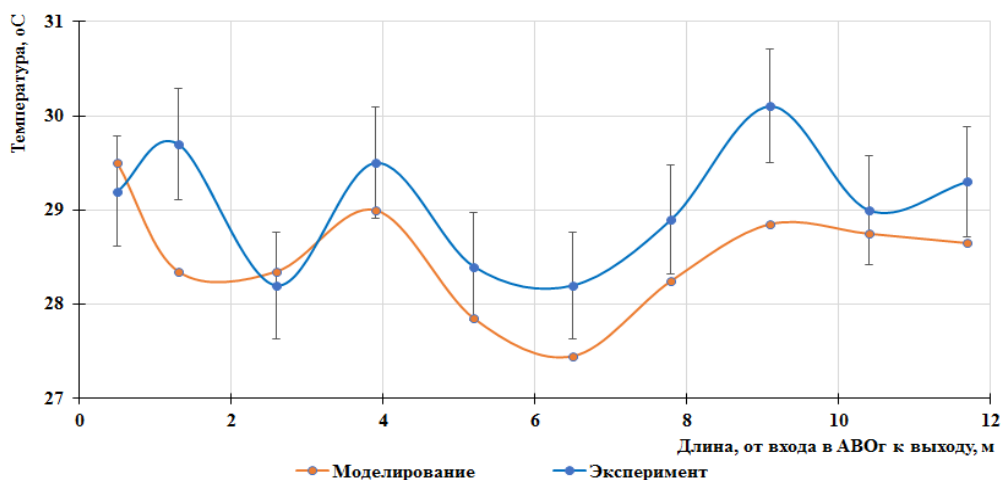


Рис. 7. Температура стенки верхней трубы, сравнение значений замеров с моделированием

Исходя из рис. 7 видно, что CFD-модель корректно воспроизводит характер распределения температуры вдоль трубы, что подтверждает адекватное описание теплообмена и внешних воздействий. Занижение расчётных температур относительно эксперимента может объясняться упрощениями: неопределённостью коэффициента поглощения солнечного излучения, идеализацией обдува (скорость ветра) и различием между измеряемой тепловизором поверхностной температурой и расчётной в точке модели. Тем не менее согласование по форме кривой доказывает пригодность модели для анализа влияния внешних условий и режимов работы, а наблюдаемое смещение по уровню указывает направление для калибровки (радиационные характеристики, обдув). Таким образом, численная модель обеспечивает приемлемую точность для инженерного анализа и сравнительной оценки эксплуатационных режимов АВОГ.

Разработка расчетной зависимости. Для более глубокого анализа результатов исследования установки, было проведено математическое моделирование, основанное на преобразовании уравнения Шухова и уравнения теплового баланса. В результате этих преобразований была получена зависимость, позволяющая вычислить температуру газа на выходе из установки для различных режимов ее работы. Данная методология соответствует подходам, предложенным в предыдущих исследованиях, упомянутых в работах [20–22]. Математическое моделирование, использующее уравнение Шухова, которое описывает теплопередачу в системах, а также уравнение теплового баланса, позволяющее учитывать сохранение энергии, стало основой для разработки данной зависимости. Это позволяет исследовать влияние различных факторов, таких как температура входящего газа и параметры теплообмена, на конечную температуру газа на выходе. Полученная зависимость представляет собой важный инструмент для оптимизации работы установки, поскольку она дает возможность анализировать результаты в зависимости от изменения режимов работы, что, в свою очередь, способствует повышению эффективности процесса:

$$t_x = t_{\text{нар.возд.}} + (t_{\text{вх.АВО}} - t_{\text{нар.возд.}}) \cdot e^{-\frac{a \cdot x}{L}}, \quad (11)$$

$$t_{\text{вых.АВО}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{2\text{вент}}} (G_i \cdot t_i) \cdot \sum_{j=1}^{n_{1\text{вент}}} (G_j \cdot t_j) \cdot \sum_{k=1}^{n_{0\text{вент}}} (G_k \cdot t_k)}{G_{\Sigma}},$$

$$t_{\text{вых.АВО}} = \frac{n_{2\text{вент}} \cdot (t_{\text{нар.возд.}} + (t_{\text{вх.АВО}} - t_{\text{нар.возд.}}) \cdot e^{-a}) + n_{1\text{вент}} \cdot (t_{\text{нар.возд.}} + (t_{\text{вх.АВО}} - t_{\text{нар.возд.}}) \cdot e^{-0,5a}) + n_{0\text{вент}} \cdot t_{\text{вх.АВО}}}{n_{2\text{вент}} + n_{1\text{вент}} + n_{0\text{вент}}},$$

где $t_{\text{нар.возд.}}$ – температура воздуха окружающей среды, °C; $t_{\text{вх.АВО}}$ – температура газа на входе в АВОГ, °C; L – длина теплообменной секции, м; x – расстояние от начала теплообменной секции до рассматриваемой точки, м; t_x – температура газа на расстоянии x от начала теплообменной секции АВОГ, °C; a – критерий Шухова; $n_0, 1, 2$ вент, G_i, j, k, t_i, j, k – количество, массовые расходы газа и температура на выходе, отнесённые к АВОГ работающие при выключенных, частично включённых и полностью включённых вентиляторах соответственно [20, 21]. Уравнение Шухова (11) является частным аналитическим решением одномерного уравнения энергии (6). Оно получается из (6) при следующих допущениях: стационарное течение в трубе с постоянной скоростью, пренебрежение осевой теплопроводностью, постоянство коэффициента теплопередачи k и теплофизических свойств газа по длине. В отличие от полных трёхмерных уравнений Навье-Стокса (1-5) и энергии (6), которые решаются численно в ANSYS Fluent, уравнение Шухова не учитывает развитие пограничного слоя на входном участке, локальные изменения свойств и трёхмерные эффекты. Однако благодаря своей простоте оно может использоваться для инженерных экспресс-оценок. Сравнение результатов CFD-моделирования и расчётов по уравнению Шухова приведено на рис. 10. Также для дальнейшего моделирования работы аппарата был выполнен расчёт коэффициента теплопередачи (12), используя стандартную теорию теплообмена [20, 21]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum R_i + \frac{1}{h_2 \cdot \eta_{\text{ор}}}}, \quad (12)$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); h_1 – коэффициент теплоотдачи от газа к стенке трубы, Вт/(м²·К); $\sum R_i$ – суммарное термическое сопротивление теплообменных труб, (м²·К)/Вт; h_2 – коэффициент теплоотдачи от теплообменной трубы к воздуху, Вт/(м²·К); $\eta_{\text{ор}}$ – коэффициент эффективности оребрения. Расчёт по выражению (11) включает в себя измерение температуры атмосферного воздуха, температур газа на входе и выходе, а также подсчет количества аппаратов с выключенными, частично включёнными и полностью включёнными вентиляторами. Эти данные используются для определения величины критерия Шухова и температуры газа на выходе системы для текущих условий. Далее для дальнейших расчетов задаются новые параметры работы УОГ, и эти числа вместе с уже известным значением критерия Шухова, текущей температурой воздуха и входной температурой газа в системе охлаждения подставляются в то же выражение (11). Результатом является выходная температура газа в системе охлаждения при новом наборе рабочих параметров УОГ [20].

Сам критерий Шухова может быть вычислен по соотношению:

$$a = \ln \frac{T_n - T_o}{T_k - T_o} = \frac{k \cdot \pi \cdot D \cdot L}{G \cdot c_p},$$

где T_n – температура на входе, К; T_o – температура окружающей среды, К; T_k – температура на выходе, К; k – коэффициент теплопередачи для данного режима работы аппарата Вт/(м²·К); D , L – диаметр и длина теплообменных трубок аппарата, м; G – массовый расход газа, кг/с; c_p – изобарная теплоёмкость газа, Дж/(кг·К) [22].

По результатам моделирования (рисунок 8) можно сделать выводы о том, что при заданных условиях работы, разность температур в УОГ очень мала. Из чего можно сделать вывод, что охлаждения как такового почти не происходит, а температура на выходе начинает уменьшаться при включении вентиляторов.

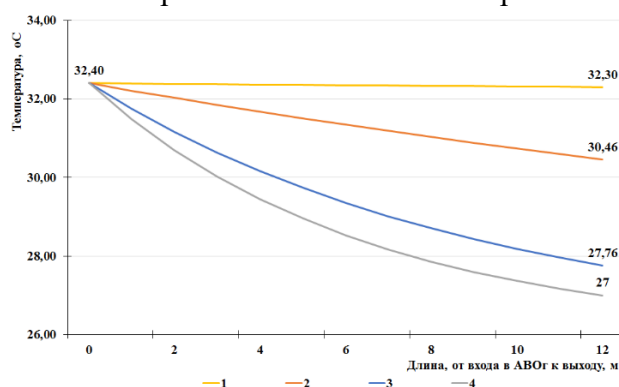


Рис. 8. Расчётная температура газа на выходе из УОГ:

1 – все вентиляторы выключены; 2 – включено половина вентиляторов;
3 – половина АВОГ работают с 1 включенным, половина с 2; 4 – все вентиляторы включены

Однако, данные расчёты не могут в полной мере описать все условия, воздействующих на АВОГ.

Разработка расчетной зависимости с учетом внешних факторов. После данного моделирования, в уравнение была добавлена составляющая, которая учитывает вклад тепла, получаемого от Солнца, здесь можно учесть такие составляющие, которые используются при расчётах солнечных панелей, а именно интенсивность, площадь облучения и коэффициент поглощения.

Таким образом, вышепоказанную математическую модель предлагается улучшить следующим образом. При расчётах следует учитывать влияния внешних факторов, таких как солнечное излучение, влажность воздуха, загрязнение наружных поверхностей ТС, температура окружающей среды, а также конструктивные параметры оребренных трубок и ТС. Влияние внешних факторов на эффективность теплообмена в аппарате приведено ниже.

Солнечное излучение. Поглощение солнечной радиации приводит к дополнительному нагреву наружной поверхности оребренных трубок. В стационарных условиях превышение температуры стенки над температурой воздуха за счёт солнечного потока можно оценить как [23]:

$$\Delta t_{\text{солн}} = \frac{I \cdot \alpha}{h_2}.$$

Фактическая температура стенки с учётом солнечного нагрева и теплового потока от газа будет выше температуры воздуха более чем на $\Delta t_{\text{солн}}$. Однако для упрощённого инженерного расчёта по уравнению Шухова, где в качестве движущей силы используется разность температур газа и окружающего воздуха, влияние солнца можно приближённо учесть, введя эффективную температуру воздуха:

$$t_{\text{нар.эфф.}} = t_{\text{нар.возд.}} + \Delta t_{\text{солн}}.$$

Такая замена позволяет сохранить стандартную форму уравнения теплопередачи, компенсируя дополнительный нагрев стенки фиктивным повышением температуры воздуха. Более строгий подход реализован в CFD-модели, где солнечный поток задаётся непосредственно как граничное условие на поверхности трубки, и распределение температуры стенки рассчитывается из решения уравнения теплопроводности совместно с уравнениями движения и энергии для газа и воздуха.

Влажность воздуха. Влажность воздуха влияет на его теплоёмкость, что меняет теплоотдачу с внешней стороны трубок. Уточнённая теплоёмкость воздуха [23]:

$$c_{\text{вл}} = c_{\text{сух}} \cdot \left(1 + 0.622 \cdot \varphi \cdot \frac{p_{\text{в}}}{p_{\text{общ}}} \right),$$

где φ – относительная влажность воздуха, %; $p_{\text{в}}$ – парциальное давление водяного пара, Па; $p_{\text{общ}}$ – общее давление, Па.

Расчёт коэффициента теплопередачи на одну оребрённую трубку. Для расчёта коэффициента теплопередачи $K_{\text{трубки}}$ учитываются внутренние и внешние сопротивления теплопередаче, а также сопротивление теплопроводности стенки трубы:

- внутренний теплообмен, внутренний коэффициент теплоотдачи может определяться по модифицированной формуле для возможного сверхкритического состояния [24]:

$$h_1 = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \frac{\lambda_z}{d_{\text{вн}}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_z} \right)^n \cdot \left(\frac{\bar{c}_p}{c_p} \right)^m,$$

где Re – число Рейнольдса газа, рассчитанное по параметрам в ядре потока; Pr – число Прандтля газа; λ – теплопроводность газа в ядре потока, Вт/(м·К); $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, м; $\rho_{\text{ст}}$ – плотность газа при температуре стенки, кг/м³; ρ_z – плотность газа в ядре потока, кг/м³; $\bar{c}_p$ – средняя интегральная теплоёмкость в диапазоне температур от $T_{\text{ст}}$ до T_z , Дж/(кг·К); n, m – эмпирические показатели степени, зависящие от режима течения и диапазона параметров; при отсутствии детальных данных о температуре стенки (что характерно для инженерных методик на стадии предварительного расчёта) допускается использование осреднённых значений свойств по длине трубы, а поправочные множители принимаются равными единице;

- теплопроводность стенки:

$$R_{\text{стенки}} = \frac{\delta}{\lambda_{\text{стенки}} \cdot A_{\text{ор}}},$$

где δ – толщина стенки, м; $\lambda_{\text{стенки}}$ – теплопроводность материала трубки, Вт/(м·К); $A_{\text{ор}}$ – увеличенная поверхность с учётом оребрения, м²;

- внешний теплообмен:

$$h_2 = Nu \cdot \frac{\lambda_{\text{возд}}}{d_{\text{ср}}},$$

где Nu – критерий Нуссельта для воздушного потока через пучок труб; $d_{\text{ср}}$ – эквивалентный диаметр трубки, м;

- общий коэффициент теплопередачи:

$$K_{\text{трубки}} = \left(\frac{1}{h_1} + R_{\text{стенки}} + \frac{1}{h_2} \right)^{-1}.$$

Расчёт коэффициента теплопередачи для пучка трубок. Для пучка трубок, расположенных в шахматном порядке, теплообмен зависит от числа рядов $n_{\text{ряд}}$ и шага между трубками S_x, S_y . Корректирующий коэффициент ψ для пучка трубок [25, 26]:

$$\psi = f(n_{\text{ряд}}, Re),$$

средний коэффициент теплопередачи пучка:

$$K_{\text{пучка}} = K_{\text{трубки}} \cdot \psi.$$

И с учётом всех этих поправок, температуру газа по длине трубки можно выразить в следующем виде:

$$T_{\Gamma}(x) = T_{\text{ГВХ}} + (T_{\text{ГВЫХ}} - T_{\text{ГВХ}}) \cdot e^{-\frac{K_{\text{пучка}} \cdot x}{\dot{m} \cdot C_p}},$$

где $T_{\text{ГВХ}}, T_{\text{ГВЫХ}}$ – температуры газа на входе и выходе, К; x – текущая длина трубки, м; $\dot{m}$ – массовый расход газа, кг/с; C_p – теплоёмкость газа, Дж/(кг·К).

Алгоритм расчета можно представить в следующем порядке. Сначала необходимо определить параметры газа, такие как скорость, температура, теплоемкость, плотность и влажность. Затем вычисляется внутренний коэффициент теплоотдачи h_1 . После этого рассчитывается сопротивление теплопроводности стенки трубки $R_{\text{стенки}}$. Далее следует определить внешний коэффициент теплоотдачи α_2 , принимая во внимание влажность и солнечное излучение. После этого вычисляется коэффициент теплопередачи для одной трубки, а затем выполняется корректировка для пучка трубок $K_{\text{пучка}}$. На заключительном этапе строится распределение температуры вдоль длины трубки. На рисунке 9 представлена расчётная температура газа на выходе из УОГ с учётом внешних факторов.

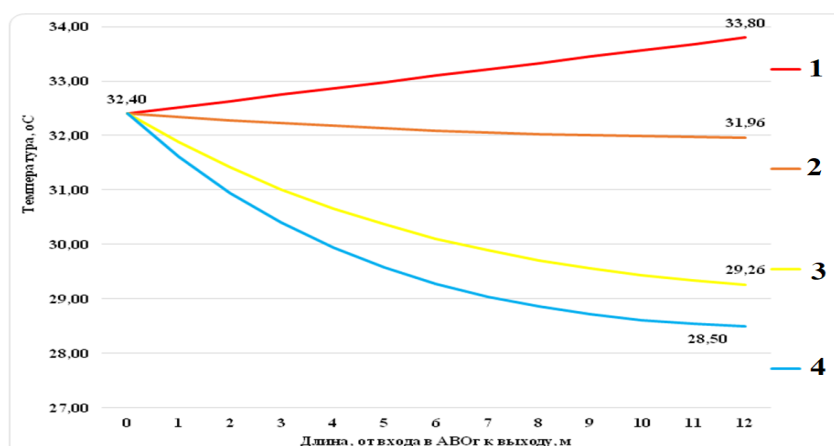


Рис. 9. Расчётная температура газа на выходе из УОГ с учётом внешних факторов:

1 – все вентиляторы включены; 2 – включено половина вентиляторов;
3 – половина АВОГ работают с 1 включенным, половина с 2; 4 – все вентиляторы включены

Таким образом, предлагаемая методика позволяет учитывать влияние внешних факторов и конструктивных особенностей АВОг. На рисунке 10 приведено сравнение проведенного моделирования в программе ANSYS Fluent и разработанной расчетной зависимости изменения температуры ядра потока газа от длины от входа АВОг к выходу.

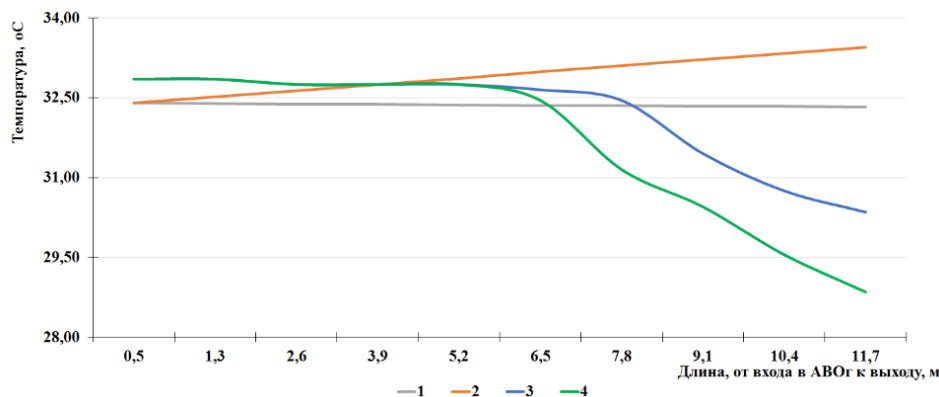


Рис. 10. Сравнение проведенного моделирования в программе ANSYS Fluent и разработанной расчетной зависимости изменения температуры ядра потока газа от длины от входа АВОг к выходу:

1 – математическая модель без учёта внешних воздействий; 2 – математическая модель с учётом внешних воздействий; 3 – CFD с учётом внешних воздействий; 4 – CFD без учёта внешних воздействий

Исходя из рисунка 10, можно заключить, что согласование результатов между математической моделью и данными CFD-моделирования в целом подтверждает адекватность предложенной математической модели. Характерное расхождение кривых, в частности, более интенсивное падение температуры в начальном участке по данным CFD (кривые 3 и 4), является ожидаемым и объяснимым с физической точки зрения, так как в отличие от математической модели, где теплообмен описывается осредненными коэффициентами, CFD-моделирование точнее учитывает формирование и развитие пограничного слоя на входном участке трубы. В этой зоне толщина гидродинамического и теплового пограничных слоев минимальна, что приводит к максимальным градиентам температуры и коэффициентам теплоотдачи, а следовательно, и к более интенсивному теплосъему [24, 25]. Незначительные расхождения в дальней зоне обусловлены принятыми в аналитической модели допущениями, в частности, идеализацией условий обтекания пучка труб и постоянством коэффициентов теплоотдачи по длине. Проведенное сравнение не только верифицирует разработанную методику как надежный инструмент для инженерного анализа, но и подчеркивает преимущества CFD-подхода для более детального исследования локальных тепловых процессов в аппаратах воздушного охлаждения газа.

Выводы. На основе проведенного моделирования и анализа результатов установлено, что солнечное излучение оказывает значительное влияние на процесс охлаждения газа воздухом в установке даже при уменьшенных масштабах, особенно в условиях естественной конвекции. Это подчеркивает необходимость учета солнечных факторов при проектировании и проверке подобных систем теплообмена. Разность конечной температуры газа составила приблизительно 1,35 градуса, что свидетельствует об эффективности системы охлаждения, но также указывает на возможность ее дальнейшего совершенствования. Наблюдаемая вариативность точки начала охлаждения газа (0,275 м в первом случае и 0,475 м во втором) может быть связана с прогревом среды охлаждения, приводящим к уменьшению теплового напора, а также с нагревом верхней части оребренной трубы, ухудшающим теплообмен.

Для повышения эффективности работы системы рекомендуется разработать меры по снижению воздействия солнечного излучения на теплообменные поверхности, включая применение защитных экранов, предотвращающих прямое попадание солнечных лучей. Анализ температурных графиков показывает целесообразность оптимизации процесса охлаждения газа в начальном участке трубы, что может способствовать более интенсивному снижению температуры. Кроме того, результаты инструментального обследования подтверждают, что включение дополнительных вентиляторов охлаждения в некоторых случаях способствует повышению общей эффективности системы и улучшению теплообмена. Полученные выводы и рекомендации будут служить основой для дальнейших исследований и оптимизации процессов теплообмена в установках воздушного охлаждения газа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карпов, Е. В. Обоснование выбора критерия для мониторинга эффективности охлаждения установок и аппаратов воздушного охлаждения газа / Е. В. Карпов, Р. Р. Сагитов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – № 1. – С. 51–55.
2. Шибитова, Н. В. Аппараты воздушного охлаждения / Н. В. Шибитова, Н. С. Шибитов, А. Б. Голованчиков. – Волгоград: ВолгГТУ, 2019. – 96 с.
3. Установки и аппараты воздушного охлаждения газа. Технические требования : СТО Газпром 2-3.5-510-2010 / разработ. ООО «ВНИИГАЗ»; утв. и введ. в действие распоряжением ОАО «Газпром» от 14 окт. 2010 г. № 31. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2011. – 35 с.
4. Методика проведения энергоаудита компрессорной станции, компрессорных цехов с газотурбинными и электроприводными ГПА : СТО Газпром 2-1.20-122-2007 / разработ. ООО «ВНИИГАЗ»; утв. и введ. в действие распоряжением ОАО «Газпром» от 5 марта 2007 г. № 31. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – 115 с.
5. Кунтыш, В. Б. К задаче расчета вибрационной надежности пучков из биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий // Вестник международной академии холода. – 2013. – № 2. – С. 46–50.
6. Галимов, Д. И. Повышение энергоэффективности компрессорной станции путем совершенствования аппаратов воздушного охлаждения газа: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Галимов Денис Ильдарович; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2022. – 145 с.
7. Ванчин, А. Г. Методы оценки работы аппаратов воздушного охлаждения газа при разных вариантах включения вентиляторов / А. Г. Ванчин // Нефтегазовое дело : электрон. науч. журн. / УГНТУ. – 2012. – № 5. – С. 279–286.
8. Абед, А. Х. Интенсификация теплообмена энергетического оборудования АЭС с использованием водовоздушного аэрозоля: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03 / Абед Ахмед Хамди; УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2020. – 188 с.
9. Терехов, В. И. Аэродинамика и теплообмен в каналах с сотовыми поверхностями и вихревыми матрицами : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.05 / Терехов Владислав Игоревич; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2022. – 145 с.
10. Романюк, Д. А. Нестационарные двухфазные течения газа с частицами в решетках профилей / Д. А. Романюк, Ю. М. Циркунов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2020. – № 5. – С. 33–45.
11. Гладышев, Н. Н. Инновационные технологии использования тепловой и электрической энергии / Н. Н. Гладышев, Т. Ю. Короткова, И. С. Базулин. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 154 с.
12. Чистяков, А. Е. Разностная схема с улучшенной аппроксимацией на границе для уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода / А. Е. Чистяков, И. Ю. Кузнецова // Computational Mathematics and Information Technologies. – 2025. – Т. 9, № 2. – С. 7–21.
13. Басов, А. А. Децентрализованная бортовая система терморегулирования пассивного типа с автономным управлением: дис. ... канд. техн. наук 01.04.14 / Басов Андрей Александрович; ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (НИУ)», 2018. – 181 с.
14. Апфельбаум, Е. М. Универсальное уравнение состояния для критической и сверхкритических областей / Е. М. Апфельбаум, В. С. Воробьев // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 6. – С. 852–859.
15. Tsonopoulos, C. An Empirical Correlation of Second Virial Coefficients / C. Tsonopoulos // AIChE Journal. – 1974. – Vol. 20, No. 2. – P. 263–272.

16. Tan, K. Computational fluid dynamic modeling of methane-hydrogen mixture transportation in pipelines: Estimating energy costs / K. Tan, D. Mahajan, T. A. Venkatesh // *MRS Advances*. – 2022. – Vol. 7, No. 19. – P. 388–393.
17. Arroyo, J. CFD modeling and validation of blast furnace gas/natural gas mixture combustion in an experimental industrial furnace / J. Arroyo, L. Perez, V. Cuervo-Pinera // *Processes*. – 2023. – Vol. 11, No. 2. – P. 332.
18. CFD-based erosion and corrosion modeling of a pipeline with CO₂-containing gas–water two-phase flow / W. Wang [et al.] // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 5. – P. 1694.
19. Syafiq, R. N. Cooling Energy Harvesting from Liquefied Natural Gas Vaporizer Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Technique / R. N. Syafiq, M. F. A. Ahmad, H. B. M. Puad // *Innovative Manufacturing, Mechatronics & Materials Forum*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – P. 495–504.
20. Ванчин, А. Г. Техничко-экономическая оценка работы газотранспортного узла / А. Г. Ванчин // *Нефтегазовое дело : электрон. науч. журн. / УГНТУ*. – 2012. – № 5. – С. 124–137.
21. Ванчин, А. Г. Расчет работы узла воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода / А. Г. Ванчин // *Нефтегазовое дело : электрон. науч. журн. / УГНТУ*. – 2013. – № 3. – С. 164–179.
22. Дьяконов, В. Г. Основы теплопередачи и массообмена: учебное пособие / В. Г. Дьяконов, О. А. Лончаков ; М-во образования и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : КНИТУ, 2015. – 244 с.
23. Марков, Н. А. Отопление: учебное пособие / Н. А. Марков ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2025. – 160 с. – ISBN 978-5-9984-2074-0.
24. Forooghi, P. Experimental analysis of heat transfer of supercritical fluids in plate heat exchangers / P. Forooghi, K. Hooman // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 74. – P. 448–459.
25. Маршалова, Г. С. Свободно-конвективный теплообмен на круглоребристых трубах и пучках из них / Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий, В. Б. Кунтыш // *Инженерно-физический журнал*. – 2023. – Т. 96, № 4. – С. 1091–1105.
26. Маршалова, Г. С. Экспериментальное исследование влияния внешнего загрязнения на теплоотдачу однорядного теплообменного пучка из круглоребристых труб в условиях интенсифицированной свободной конвекции / Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий, Д. В. Островская, Е. С. Данильчик // *Инженерно-физический журнал*. – 2025. – Т. 98, № 1. – С. 46–54.

REFERENCES LIST

1. Karpov, E. V. Obosnovanie vybora kriteriia dlia monitoringa effektivnosti okhlazhdeniia ustanovok i apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia gaza / E. V. Karpov, R. R. Sagitov // *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. – 2014. – № 1. – S. 51–55.
2. Shubitova, N. V. Apparaty vozdushnogo okhlazhdeniia / N. V. Shubitova, N. S. Shibitov, A. B. Golovanchikov. – Volgograd: VolGTU, 2019. – 96 s.
3. Ustanovki i apparaty vozdushnogo okhlazhdeniia gaza. Tekhnicheskie trebovaniia : STO Gazprom 2-3.5-510-2010 / razrab. OOO «VNIIGAZ» ; utv. i vved. v deistvie raspriazheniem OAO «Gazprom» ot 14 okt. 2010 g. № 31. – М. : OOO «IRTs Gazprom», 2011. – 35 s.
4. Metodika provedeniia energoaudita kompressornoj stantsii, kompressornykh tsekhov s gazoturbinnymi i elektroprivodnymi GPA : STO Gazprom 2-1.20-122-2007 / razrab. OOO «VNIIGAZ» ; utv. i vved. v deistvie raspriazheniem OAO «Gazprom» ot 5 marta 2007 g. № 31. – М. : OOO «IRTs Gazprom», 2007. – 115 s.
5. Kuntyshev, V. B. K zadache rascheta vibratsionnoi nadezhnosti puchkov iz bimetallicheskich rebristyx trub apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia / V. B. Kuntyshev, A. B. Sukhotskii // *Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda*. – 2013. – № 2. – S. 46–50.
6. Galimov, D. I. Povyshenie energoeffektivnosti kompressornoj stantsii putem sovershenstvovaniia apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia gaza: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.04 / Galimov Denis Ildarovich ; Ufimskii gosudarstvennyi neftianoi tekhnicheskii universitet. – Ufa, 2022. – 145 s.
7. Vanchin, A. G. Metody otsenki raboty apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia gaza pri raznykh variantakh vklucheniia ventilatorov / A. G. Vanchin // *Neftgazovoe delo : elektron. nauch. zhurn. / UGNTU*. – 2012. – № 5. – S. 279–286.

8. Abed, A. Kh. Intensifikatsiia teploobmena energeticheskogo oborudovaniia AES s ispolzovaniem vodovozdushnogo aerozolia: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.03 / Abed Akhmed Khamdi; UrFU im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. Eltsina. – Ekaterinburg, 2020. – 188 s.
9. Terekhov, V. I. Aerodinamika i teploobmen v kanalakh s sotovymi poverkhnostiami i vikhrevymi matritsami : dis. ... kand. tekhn. nauk : 01.02.05 / Terekhov Vladislav Igorevich ; Novosib. gos. tekhn. un-t. – Novosibirsk, 2022. – 145 s.
10. Romaniuk, D. A. Nestatsionarnye dvukhfaznye techeniia gaza s chastitsami v reshetkakh profilei / D. A. Romaniuk, Iu. M. Tsirkunov // Izvestiia RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza. – 2020. – № 5. – S. 33–45.
11. Gladyshev, N. N. Innovatsionnye tekhnologii ispolzovaniia teplovoi i elektricheskoi energii / N. N. Gladyshev, T. Iu. Korotkova, I. S. Bazulin. – SPb. : VShTE SPbGUPTD, 2021. – 154 s.
12. Chistiakov, A. E. Raznostnaia skhema s uluchshennoi approksimatsiei na granitse dlia uravneniia teploprovodnosti s granichnymi usloviiami tretego roda / A. E. Chistiakov, I. Iu. Kuznetsova // Computational Mathematics and Information Technologies. – 2025. – T. 9, № 2. – S. 7–21.
13. Basov, A. A. Detsentralizovannaia bortovaia sistema termoregulirovaniia passivnogo tipa s avtonomnym upravleniem: dis. ... kand. tekhn. nauk 01.04.14 / Basov Andrei Aleksandrovich; FGBOU VO «Moskovskii aviatsionnyi institut (NIU)», 2018. – 181 s.
14. Apfelbaum, E. M. Universalnoe uravnenie sostoianiia dlia kriticheskoi i sverkhkriticheskikh oblastei / E. M. Apfelbaum, V. S. Vorobev // Teplofizika vysokikh temperatur. – 2021. – T. 59, № 6. – S. 852–859.
15. Tsonopoulos, C. An Empirical Correlation of Second Virial Coefficients / C. Tsonopoulos // AIChE Journal. – 1974. – Vol. 20, No. 2. – P. 263–272.
16. Tan, K. Computational fluid dynamic modeling of methane-hydrogen mixture transportation in pipelines: Estimating energy costs / K. Tan, D. Mahajan, T. A. Venkatesh // MRS Advances. – 2022. – Vol. 7, No. 19. – P. 388–393.
17. Arroyo, J. CFD modeling and validation of blast furnace gas/natural gas mixture combustion in an experimental industrial furnace / J. Arroyo, L. Perez, V. Cuervo-Pinera // Processes. – 2023. – Vol. 11, No. 2. – P. 332.
18. CFD-based erosion and corrosion modeling of a pipeline with CO₂-containing gas–water two-phase flow / W. Wang [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 5. – P. 1694.
19. Syafiq, R. N. Cooling Energy Harvesting from Liquefied Natural Gas Vaporizer Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Technique / R. N. Syafiq, M. F. A. Ahmad, H. B. M. Puad // Innovative Manufacturing, Mechatronics & Materials Forum. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – P. 495–504.
20. Vanchin, A. G. Tekhniko-ekonomicheskaiia otsenka raboty gazotransportnogo uzla / A. G. Vanchin // Neftegazovoe delo : elektron. nauch. zhurn. / UGNTU. – 2012. – № 5. – S. 124–137.
21. Vanchin, A. G. Raschet raboty uzla vozdushnogo okhlazhdeniia gaza v usloviiakh kompressornoii stantsii magistralnogo gazoprovoda / A. G. Vanchin // Neftegazovoe delo : elektron. nauch. zhurn. / UGNTU. – 2013. – № 3. – S. 164–179.
22. Diakonov, V. G. Osnovy teploperedachi i massoobmena: uchebnoe posobie / V. G. Diakonov, O. A. Lonshchakov ; M-vo obrazovaniia i nauki Rossii, Kazan. nats. issled. tekhnol. un-t. – Kazan : KNITU, 2015. – 244 s.
23. Markov, N. A. Otoplenie: uchebnoe posobie / N. A. Markov ; Vladim. gos. un-t im. A. G. i N. G. Stoletovykh. – Vladimir: Izd-vo VIGU, 2025. – 160 s. – ISBN 978-5-9984-2074-0.
24. Forooghi, P. Experimental analysis of heat transfer of supercritical fluids in plate heat exchangers / P. Forooghi, K. Hooman // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 74. – P. 448–459.
25. Marshalova, G. S. Svobodno-konvektivnyi teploobmen na kruglorebristyykh trubakh i puchkakh iz nikh / G. S. Marshalova, A. B. Sukhotskii, V. B. Kuntyshev // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. – 2023. – T. 96, № 4. – S. 1091–1105.
26. Marshalova, G. S. Eksperimentalnoe issledovanie vliianiia vneshnego zagriazneniia na teplootdachu odnoriadnogo teploobmennogo puchka iz kruglorebristyykh trub v usloviiakh intensifitsirovannoi svobodnoi konveksii / G. S. Marshalova, A. B. Sukhotskii, D. V. Ostrovskaia, E. S. Danilchik // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. – 2025. – T. 98, № 1. – S. 46–54.

Поступила в редакцию 23.09.2025 г., рекомендована к изданию 16.03.2026 г.

NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN AIR GAS COOLING DEVICES TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF EXTERNAL EFFECTS

Zakharov A.S., Aetov A.U., Saliakhov R.KH., Gilmudinov I.M.

In this paper, the cooling process in natural gas air coolers (AGOC) is investigated. An instrumental survey program has been developed, which represents modifications of the previously existing efficiency assessment program. The object of the study was a gas cooling unit consisting of 16 AGOCs of the 2AVG-75 model, located at the Arskaya compressor station of Gazprom Transgaz Kazan LLC. Based on technical documentation, personnel questionnaires, and analysis of data from the instrumental survey program, the natural gas cooling process was simulated. Mathematical modeling is provided, which allows for a deeper understanding of the mechanisms influencing the natural gas cooling process. The results obtained are aimed at optimizing the cooling process and increasing the efficiency of compressor stations.

Keywords: air coolers, heat transfer natural gas, modeling, solar radiation, compressor station.

Захаров Александр Сергеевич

аспирант кафедры технологии конструкционных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: alexanderzaharo@yandex.ru

Zakharov Aleksandr Sergeevich

Postgraduate student at Department of Structural Materials Technology of Kazan National Research Technological University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2470-484X>

Аетов Алмаз Уралович

старший преподаватель кафедры теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: aetovalmaz@mail.ru

Aetov Almaz Uralovich

Senior Lecturer at Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering of Kazan National Research Technological University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9371-332X>

Саляхов Рамис Харисович

заместитель генерального директора по производству ООО «Газпром трансгаз Казань» - ПАО «Газпром», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: turbogazr@yandex.ru

Saliakhov Ramis KHarisovich

Deputy General Director for Production of Gazprom Transgaz Kazan LLC - Gazprom PJSC, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8480-4935>

Гильмутдинов Ильфар Маликович

доктор технических наук, и.о. заведующего кафедрой технологии конструкционных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: gilmudinovIM@corp.knrtu.ru

Gilmudinov Ilfar Malikovich

Doctor of Technical Sciences, Acting Head of the Department of Structural Materials Technology of Kazan National Research Technological University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4241-6306>

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ТОКОВ В ПРОВОДНИКАХ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ПО ДАННЫМ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2026 *Горошков В.А., Коровкин Н.В., Гришенцев А.Ю., Герасимов И.В., Вэньлун И., Касьянов А.В.*

Предметом исследования является разработка бесконтактного метода идентификации токов в проводниках воздушной линии электропередач по данным измерения магнитного поля в электробезопасной окрестности исследуемой линии. Предлагается метод решения обратной задачи идентификации тока в длинной линии по результатам высокоточных измерений магнитного поля на основе современной приборной базы и последующей обработкой данных измерений с применением моделирования магнитного поля методом зеркальных изображений, частотной избирательностью. Решение задачи идентификации токов в проводниках осуществляется за счёт вычисления корней системы линейных алгебраических уравнений во временной или частотной области. Возможна организация круглосуточного полностью автоматического мониторинга. Основным результатом является разработка метода бесконтактной идентификации токов в проводниках воздушной линии электропередач и численное моделирование некоторых примеров. Практическими областями применения предлагаемого метода являются задачи технического и учётного надзора, экологического мониторинга, информационного противоборства и защиты информации.

Ключевые слова: идентификация токов в воздушной линии, мощностные режимы, ЛЭП, магнитное поле, информационная безопасность, информационное противоборство.

Введение. Современные аппаратно-программные средства в совокупности с различными датчиками интенсивно используются в задачах повышения эффективности производства, фундаментальным результатом таких внедрений является «индустрия 4.х» [1]. Возможности мониторинга и управления на базе электронных средств не обходят стороной производство и распределение электроэнергии. Одной из значимых задач является мониторинг мощностных режимов работы линий электропередач (ЛЭП), распределительных устройств, трансформаторов и других средств производства и передачи электроэнергии [2, 3].

Применение бесконтактных датчиков магнитного поля для определения токов в проводниках воздушной ЛЭП, актуально для задач технического и учётного надзора, экологического мониторинга, информационного противоборства и защиты информации. Предлагаемый метод бесконтактного мониторинга, обладает рядом преимуществ по сравнению с методами контактными, в частности, не требуется отключения ЛЭП от напряжения на период монтажа и наладки датчиков. Принцип реализации метода достаточно прост и не использует дорогостоящее оборудование, позволяет получать результаты в режиме реального времени. Имеется возможность скрытного мониторинга мощностных режимов ЛЭП [4], что может быть использовано не только для решения задач технического и учётного надзора, но и для несанкционированного съёма информации о потреблении электроэнергии различными абонентами электросети, в том числе имеющими статус объектов критической инфраструктуры [5, 6].

Цель исследования: разработка и моделирование метода бесконтактного мониторинга мощностных режимов воздушных линий электропередач.

Задачи подобного типа относятся к классу обратных задач, т.е. идентификации режимов и параметров работы электрических цепей. Обратная задача определения токов в длинных линиях бесконтактными методами актуальна как с точки зрения развития теории электротехники, так и для практических приложений, например, идентификации: потребляемых мощностей в штатных [7] и аварийных режимах [8]; утечки информации о режимах работы линий электропередач [9, 10]; задачах экологического мониторинга и электробезопасности [11] и пр.

Математическая модель. Поля длинных линейно протяжённых проводников воздушных линий электропередач с достаточно высокой точностью можно считать плоскопараллельными. Такое допущение существенно упрощает задачу и хорошо обосновано теорией электромагнитного поля [12], поэтому многие исследования делаются при указанном допущении. Будем считать поле длинной линии плоскопараллельным. Учитывая частоту первой гармоники токов – 50 Гц при скорости света $c \approx 299792.5 \text{ км/с}$, длина волны $\lambda \approx 6000 \text{ км}$, что с учётом фактических размеров исследуемого объёма (десятки метров), позволяет считать задачу квазистационарной. Значит, распределение магнитного поля в исследуемой области с достаточно высокой точностью удовлетворяет уравнениям Лапласа (1). Задав двумерную систему координат Oxy в плоскости поперечного сечения длинной линии, исключая области проводников с током, запишем:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U_M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_M}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 V_M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_M}{\partial y^2} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где U_M – скалярный потенциал магнитного поля; V_M – функция потока магнитного поля. Вектор напряжённости магнитного поля можно вычислить как: $\mathbf{H} = \mathbf{e}_x \frac{\partial U_M}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial U_M}{\partial y}$, где $\mathbf{e}_x$ и $\mathbf{e}_y$ – единичные векторы плоскости Oxy . На изображении (рис. 1б) приведена картина магнитного поля воздушной ЛЭП, построенная на основании решения (1) методом конечных элементов. Линии магнитного потока ($V_M = \text{const}$) обозначены сиреневым цветом, линии скалярного потенциала магнитного поля ($U_M = \text{const}$) – красным цветом.

В точке с координатами (x_p, y_p) обозначим $\mathbf{B}_{pq}(t)$ – вектор индукции магнитного поля, обусловленного проводником q с координатами (x_q, y_q) и током $i_q(t)$, $q = \overline{1, Q}$. Положим, что плоскость Oxy является комплексной, ось Ox – соответствует вещественным значениям $(\text{Re}[\mathbf{B}_{pq}(t)])$, а ось Oy – мнимым значениям $(\text{Im}[\mathbf{B}_{pq}(t)])$ (рис. 1а). Тогда запишем выражение для расчёта вектора $\mathbf{B}_{pq}(t)$ используя закон Био-Савара-Лапласа:

$$\mathbf{B}_{pq}(t) = \mathbf{e}_x \text{Re}[\mathbf{B}_{pq}(t)] + \mathbf{e}_y j \text{Im}[\mathbf{B}_{pq}(t)] = i_q(t) \frac{\mu_0 \mu_1 (-\mathbf{e}_x \sin(\alpha_{pq}) + j \mathbf{e}_y \cos(\alpha_{pq}))}{2\pi \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}}, \quad (2)$$

где $\mu = \mu_0 \mu_1$ – абсолютная магнитная проницаемость среды, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, $\mu_1 \approx 1$ – относительная магнитная проницаемость воздушной среды; $\alpha_{pq} = \arccatg\left(\frac{x_p - x_q}{y_p - y_q}\right)$, $\alpha_{pq} \in [0; 2\pi)$ – угол между положительным направлением оси Ox и вектором, соединяющим начальную точку (x_p, y_p) и конечную точку (x_q, y_q) .

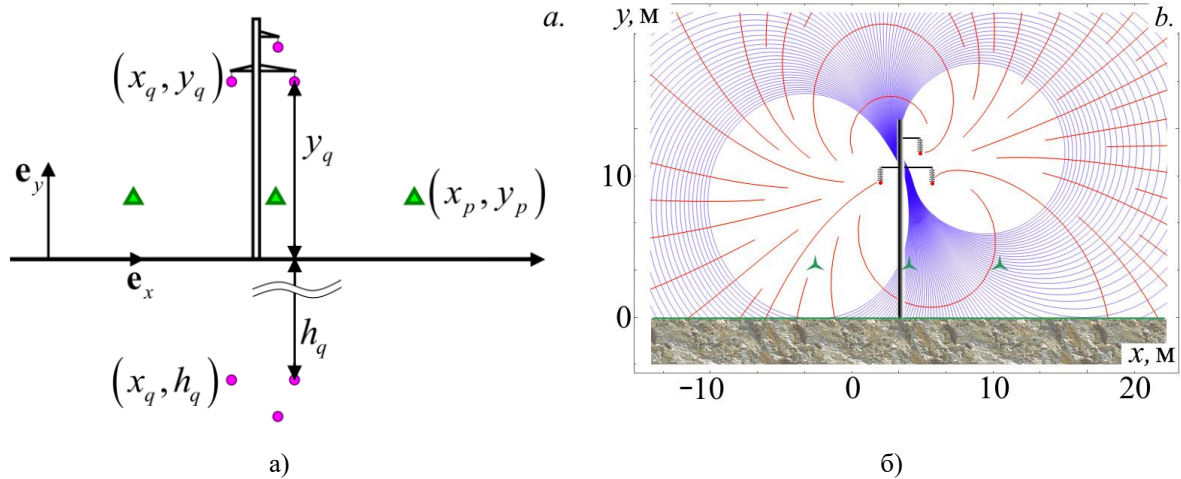


Рис. 1. Пример расположения в плоскости поперечного сечения линии проводников, их отражений и датчиков магнитного поля (а); картина магнитного поля воздушной ЛЭП, построенная на основании решения уравнений Лапласа (1) с учётом зеркальных изображений проводников (б)

Используя выбранные обозначения на основе принципа наложения (суперпозиции), полученную модель (2) можно использовать для расчёта вектора индукции $\mathbf{B}_{pq}(t)$ в произвольных точках (x_p, y_p) , где $p = \overline{1, P}$ при числе проводников с током $i_q(t)$ больше одного, т.е. $q = \overline{1, Q}$ и $Q \geq 1$.

Следуя приведённой логике, запишем в матричной форме уравнение для расчёта магнитной индукции в различные моменты времени (t) :

$$\mathbf{A}\mathbf{I}(t) = \mathbf{B}(t), \quad (3)$$

где $\mathbf{A} = (\mathbf{a}_{pq})$ – матрица размера $P \times Q$, каждый элемент матрицы:

$$\mathbf{a}_{pq} = \frac{\mu_0 \mu_1 (-\mathbf{e}_x \sin(\alpha_{pq}) + j\mathbf{e}_y \cos(\alpha_{pq}))}{2\pi \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}}, \quad (4)$$

где $\mathbf{I}(t) = (i_1(t), i_2(t), \dots, i_Q(t))^T$ – вектор-столбец токов в проводниках, $q = \overline{1, Q}$; $\mathbf{B}(t) = (\mathbf{B}_1(t), \mathbf{B}_2(t), \dots, \mathbf{B}_P(t))^T$ – вектор-столбец, образованный значениями магнитной индукции в точках (x_p, y_p) , причём $p = \overline{1, P}$. Тензорная форма записи для (3) имеет вид: $\mathbf{a}_{pq} i_q(t) = \mathbf{B}_p(t)$.

При расчёте электромагнитного поля использование метода зеркальных изображений [12] позволяет значительно повысить точность моделирования при одновременном упрощении математической модели с точки зрения перехода от неоднородной среды к однородной. Для удобства применения метода зеркальных изображений положим, что ось Ox (т.е. $y=0$) лежит в плоскости поверхности земли под ЛЭП. Будем считать, что плоскостью отражения является поверхность земли под воздушной ЛЭП (рис. 1а), а глубина расположения отражённого провода будет зависеть от проводящих свойств толщи подстилающей поверхности. Так в работе [13] предлагается оценивать глубину расположения отражённого проводника как сумму высоты расположения над поверхностью земли реального проводника с током и эквивалентной глубины проникновения σ_d электромагнитной волны в почву. Для реального проводника q с током $i_q(t)$ и координатами (x_q, y_q) глубина изображения, т.е. залегания мнимого (отражённого) проводника имеет значение $h_q = -(y_q + \sigma_d) = -\left(y_q + \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu_2\gamma}}\right)$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; μ_2 – магнитная проницаемость среды (почвы), обычно $\mu_1 \approx \mu_2 \approx 1$; γ – удельная электропроводность среды (почвы). Обозначим координаты отражённого проводника с током (x_q, h_q) . Введя изображения отраженных проводников в (4), вычислим элементы $\mathbf{a}_{pq}$ согласно (5):

$$\mathbf{a}_{pq} = \frac{\mu_0\mu_1(-\mathbf{e}_x \sin(\alpha_{pq}) + j\mathbf{e}_y \cos(\alpha_{pq}))}{2\pi\sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}} - \frac{\mu_2\mu_1(-\mathbf{e}_x \sin(\beta_{pq}) + j\mathbf{e}_y \cos(\beta_{pq}))}{2\pi\sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - h_q)^2}}, \quad (5)$$

где $\beta_{pq} = \arctg\left(\frac{x_p - x_q}{y_p - h_q}\right)$, $\beta_{pq} \in [0; 2\pi)$ – угол между положительным направлением оси Ox и вектором, соединяющим начальную точку (x_p, y_p) и конечную точку (x_q, h_q) .

Назовём полученные уравнения (3-5) решением прямой задачи: вычисления вектора магнитной индукции $\mathbf{B}_p(t)$ в точке с координатами (x_p, y_p) по известным значениям токов $i_q(t)$ в проводниках, проходящих через точки (x_q, y_q) , где $q = \overline{1, Q}$ для расположенной над плоской подстилающей поверхностью воздушной ЛЭП.

Будем называть обратной задачей вычисления значений токов $i_q(t)$ в проводниках на основании известных значений векторов магнитной индукции $\mathbf{B}_p(t)$, т.е. решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида (3) относительно вектора неизвестных $\mathbf{I}(t)$. Отметим, что СЛАУ (3) разрешима, при условии $P \geq Q$ и $\det(\mathbf{A}) \neq 0$. Для решения практической задачи необходимо: получить значения векторов магнитной индукции $\mathbf{B}_p(t)$, что можно сделать, разместив в точках (x_p, y_p)

датчики магнитного поля; определить координаты (x_q, y_q) проводников с током $i_q(t)$ и точек (x_p, y_p) в которых находятся датчики, в общей системе координат.

Оценка погрешности решения и улучшение обусловленности задачи. Запишем выражение для оценки относительной погрешности решения СЛАУ (5) в зависимости от ошибки исходных данных в различные моменты времени [14]:

$$\delta \mathbf{I}(t) = \frac{\|\Delta \mathbf{I}(t)\|}{\|\mathbf{I}(t)\|} \leq \frac{\nu(\mathbf{A})\|\mathbf{A}\|}{\|\mathbf{A}\| - \nu(\mathbf{A})\|\Delta \mathbf{A}\|} \left(\frac{\|\Delta \mathbf{B}(t)\|}{\|\mathbf{B}(t)\|} + \nu(\mathbf{A}) \frac{\|\Delta \mathbf{A}\|}{\|\mathbf{A}\|} \right), \quad (6)$$

где $\Delta \mathbf{I}(t)$ – вектор абсолютной погрешности решения; $\Delta \mathbf{B}(t)$ – вектор абсолютной погрешности правой части (3); $\nu(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\| \|\mathbf{A}^{-1}\|$ – число обусловленности матрицы $\mathbf{A}$; $\|\cdot\|$ – матричная норма. Ошибки матрицы $\Delta \mathbf{A}$ обусловлены неточностью геометрических измерений координат (x_p, y_p) и (x_q, y_q) или являются результатом изменения фактических координат с течением времени, например, изменения положения провода в результате воздействия ветра или за счёт удлинения и провисания зависящего от температуры или наледи. Возмущения $\Delta \mathbf{B}(t)$ правой части $\mathbf{B}(t)$ обусловлены собственным шумом датчиков и измерительных контуров, внешней электромагнитной помехой. Следует отметить наличие помеховой аддитивной составляющей, являющейся следствием вариаций магнитного поля Земли. Периоды колебаний геомагнитных возмущений оцениваются часовыми и суточными интервалами. За счёт относительно медленных изменений, по сравнению с частотой колебаний тока в сети 50 Гц, такая компонента будет квазистационарной и может быть легко удалена из измерений как медленно изменяющаяся аддитивная составляющая.

Обоснованно предполагается, что выбор точек (x_p, y_p) расположения датчиков будет оказывать значительное влияние на обусловленность решения обратной задачи (3) за счёт: геометрической конфигурации на величины $\nu(\mathbf{A})$; удалённости датчиков от токоведущих проводников на величину $\delta \mathbf{B}(t) = \frac{\|\Delta \mathbf{B}(t)\|}{\|\mathbf{B}(t)\|}$, т.е. амплитуду полезного сигнала и отношение сигнал/шум. Таким образом, минимизация $\nu(\mathbf{A})$ за счёт выбора точек (x_p, y_p) размещения датчиков является решением задачи оптимизации с целевой функцией (7):

$$\begin{cases} \nu(\mathbf{A}(x_p, y_p)) \rightarrow \min \\ \delta \mathbf{B}(t) \leq \eta \\ (x_p, y_p) \in \Omega \end{cases}, \quad (7)$$

где величина $\delta \mathbf{B}(t)$ – интерпретируется как одна из форм обратной величины отношения сигнал/шум для сигналов, принимаемых датчиками магнитного поля; η –

критерий допустимого отношения $\delta \mathbf{B}(t)$; Ω – область плоскости сечения, расположенная под воздушной ЛЭП, допустимого с точки зрения электробезопасности и целесообразного размещения датчиков. На практике значение $\delta \mathbf{B}(t)$ зависит от условий измерения, т.е. чувствительности и собственного шума применяемых датчиков, шума внешней среды и собственных шумов системы регистрации сигналов. Выбор точек оптимального размещения датчиков предлагается осуществлять за счёт решения задачи (7) с помощью генетического алгоритма [15]. Для каждого поколения, образованного массивами координат $((x_1, y_1), \dots, (x_p, y_p))$ и сформированного в результате работы генетического алгоритма, проводится оценка приспособленности особей согласно критерию (7). Новое поколение решений формируется на основе следующих эволюционных распределений: 5% лучших сохраняются неизменными; 15% формируются на основе мутации; 80% оставшихся решений определяются при помощи скрещивания. Выполнение алгоритма прекращается при условии стабилизации приращения величины целевой функции (7) в пределах интервала $(-10^{-3} \dots 10^{-3})$.

Учитывая, что матрица $\mathbf{A}$ стационарна от времени, а величина $\delta \mathbf{B}(t)$ с течением времени меняется на основании (6) имеется возможность вычисления оценки относительной погрешности $\delta \mathbf{I}(t)$ для различных фаз колебаний токов в ЛЭП. Для этого зададим постоянным значение возмущения $\|\Delta \mathbf{B}(t)\| = \Delta b = \text{const}$ как оценку среднего за период возмущения, тогда выражение: $\text{err}(t) = v(\mathbf{A}) \frac{\Delta b}{\|\mathbf{B}(t)\|}$ – функция выражающая зависимость верхней границы $\delta \mathbf{I}(t)$ от времени. Минимизация:

$$\min_{(t)} \left(v(\mathbf{A}) \frac{\Delta b}{\|\mathbf{B}(t)\|} \right), \quad (8)$$

позволяет определить значения одной или нескольких фаз (токов в ЛЭП), когда СЛАУ (3) обусловлена лучше.

Методы расчёта тока по измеренным значениям индукции магнитного поля. Предлагается два способа решения обратной задачи идентификации токов $\mathbf{I}$ в проводниках воздушных ЛЭП. Первый производится полностью во временной области. По результатам измерений и выбора нескольких точек по критерию (8) производится расчёт мгновенных значений токов, соответствующих выбранным временным моментам и, при необходимости, осуществляется восстановление гармонических сигналов с учётом предположения, что токи имеют монохроматическую форму. В соответствии с обобщённой теоремой В.А. Котельникова для восстановления сигнала без потерь частота дискретизации отсчётов должна быть больше удвоенной максимальной частоты в составе сигнала. Следовательно, для восстановления формы по одному периоду, число равноудалённых отсчётов (на один период) гармонического сигнала должно быть не менее трёх.

Второй способ основан на переходе в частотную область. Для этого осуществляется дискретное преобразование Фурье данных, полученных с датчиков магнитного поля: $\mathcal{F}\{\mathbf{B}(t)\} = (\mathcal{F}\{\mathbf{B}_1(t)\}, \mathcal{F}\{\mathbf{B}_2(t)\}, \dots, \mathcal{F}\{\mathbf{B}_p(t)\})^T$, где $\mathcal{F}\{\cdot\}$ – оператор

преобразования Фурье. Для минимизации «растекания» спектра временной интервал необходимо выбирать так, чтобы он содержал целое число периодов первой гармоники. В результате указанных преобразований получим вектор $\dot{\mathbf{B}}(\omega) = (\dot{\mathbf{B}}_1(\omega), \dot{\mathbf{B}}_2(\omega), \dots, \dot{\mathbf{B}}_p(\omega))^T$. Здесь, по аналогии с частотными образами гармонических токов и напряжений, применена точка над обозначением образа вектора индукции магнитного поля в частотной области. Далее для каждой частоты ω решается СЛАУ (3), и вычисляются значения частотных образов токов: $\dot{\mathbf{I}}(\omega) = (\dot{I}_1(\omega), \dot{I}_2(\omega), \dots, \dot{I}_Q(\omega))^T$. Причём в зависимости от необходимой точности вычислений, в том числе для формы токов, отличной от гармонической, можно ограничить число частот, например, используя только первую, вторую, третью и т.д. гармоники основной частоты системы электроснабжения, остальные частоты при этом приравняются к нулю. Для частотной области СЛАУ (3) имеет общий вид:

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{I}}(\omega) = \dot{\mathbf{B}}(\omega). \quad (9)$$

При необходимости получения формы тока во временной области осуществляется обратное преобразование Фурье: $\mathbf{I}(t) = (\mathcal{F}^{-1}\{\dot{I}_1(\omega)\}, \mathcal{F}^{-1}\{\dot{I}_2(\omega)\}, \dots, \mathcal{F}^{-1}\{\dot{I}_Q(\omega)\})^T$, где $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ – оператор обратного преобразования Фурье.

Если обусловленность полученной СЛАУ плохая и при этом требуется повысить точность определения токов, возможно выполнить регуляризацию методом А.Н. Тихонова [16]. Причём выбранный метод регуляризации применим как во временной области для (3), так и в частотной для (9).

Некоторые исходные данные и параметры оборудования. Некоторые свойства электромагнитных и геофизических характеристик подстилающих поверхностей [17, 18], значимые для математического моделирования, сведены в таблицу 1. Для большинства видов грунтов (чернозёма, песка, глины, суглинков, скальных пород) магнитная проницаемость практически равна величине $\mu_2 = 1$. В относительно редких случаях наличия в породе ферромагнитных включений μ_2 достигает значений $\mu_2 \gg 1$, однако такие типы пород требуют отдельного рассмотрения за рамками данной работы.

Таблица 1. Некоторые свойства подстилающих поверхностей

Тип почвы	Проводимость, См/м	Относительная магнитная проницаемость μ_2	Эквивалентная глубина проникновения ЭМ волны $\delta (f = 50 \text{ гц})$, м
Морская вода	0.1 – 10	0.99998	20 – 200
Пресная вода	$(10 - 2.5) \cdot 10^{-3}$	0.99998	700 – 1400
Песок	$(50 - 3.3) \cdot 10^{-4}$	1.00002 – 1.036	1000 – 4000
Глина	$(13 - 1.4) \cdot 10^{-2}$	0.9999 – 1.00025	200 – 600
Торф	$(20 - 0.4) \cdot 10^{-2}$	0.985 – 1.005	160 – 1100

Для измерения координат проводников и датчиков магнитного поля предлагается использовать лазерные дальномеры или системы лазерного 3D сканирования (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение некоторых технических характеристик лазерных дальномеров

Модель	Предел измерения расстояния, м	Погрешность измерения расстояния, мм	Погрешность измерения угла наклона, град
Bosch GLM 50-27 CG [19]	50	± 1.5	± 0.2
DLS-C 15 [20]	65	± 3.5	–
Leica DISTO X4 [21]	150	± 2.0	± 0.2
Trimble X7 [22]	80	± 3.0	± 0.005

Для измерения магнитной составляющей электромагнитного поля длинной линии авторами предлагается использовать промышленно производимые датчики на основе анизотропного магниторезистивного (АМР) эффекта или феррозонды [23], что обосновывается их высокой чувствительностью и точностью измерений [24] по сравнению, например, с распространёнными датчиками Холла (табл. 3).

Таблица 3. Основные характеристики датчиков магнитного поля

Наименование датчика	Тип чувствительного элемента	Диапазон измерения, мТл	Диапазон частот, Гц	Амплитуда шума датчика, нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$
A1324LUA [23]	Холла	– 44 ... + 44	$(0...17) \cdot 10^3$	130
HMC1022 [24]	АМР	– 0.2 ... + 0.2	$(0...5) \cdot 10^6$	10
MMC5983 [25]	АМР	– 0.8 ... + 0.8	0...800	40
DRV421 [26]	Феррозонд	– 1 ... + 1	$(0...2) \cdot 10^6$	$1...1 \cdot 10^{-3}$

Численное моделирование. Для демонстрации предлагаемых методов исследуем некоторые численные примеры. Пусть имеется одноцепная воздушная линия напряжением 110 кВ, необходимо выполнить оценку мощностных режимов её работы. Для решения подобной задачи сначала требуется произвести измерение координат проводников длинной линии. Зададим координаты проводов в плоскости сечения линии, в метрах: $((2,10); (7.5,10); (6,13))$. Далее, используя выражение (7), применим генетический алгоритм для определения координат оптимального размещения датчиков магнитного поля. В результате выполнения указанных действий получим данные для вычисления матрицы $\mathbf{A}$, а также информацию для установки датчиков. Выпишем полученные значения в таблицу 4 и графически отобразим на рис. 2а.

Учитывая ограничения безопасности [20] выберем высоту расположения датчиков $y_q = 4$ м над поверхностью земли, при этом число обусловленности $\nu(\mathbf{A}) = 39$. При использовании лазерного дальномера Bosch GLM 50-27 CG приборная ошибка измерения координат составляет не более ± 1.5 мм, при этом $\delta \mathbf{A} \approx 7.5 \cdot 10^{-4}$. После монтажа датчиков согласно координатам (табл. 4) осуществляется регистрация

магнитного поля на основе их показаний, т.е. векторов $(\mathbf{B}_1(t), \mathbf{B}_2(t), \dots, \mathbf{B}_p(t))^T$, сохраняемых с помощью электронного самописца или запоминающего осциллографа.

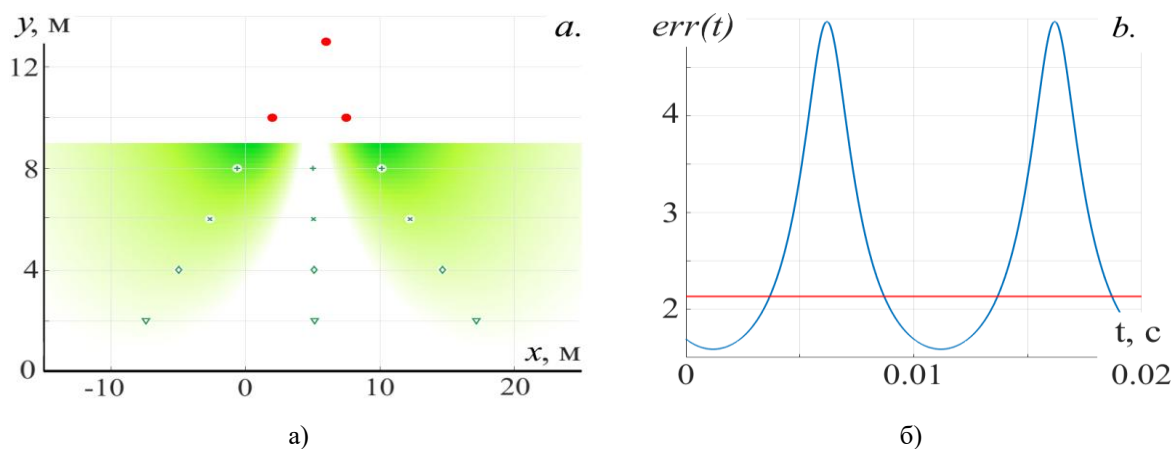


Рис. 2. Вычисленные рекомендуемые области расположения датчиков магнитного поля, с помощью градиента зелёного тёмным оттенком отмечены наиболее благоприятные области размещения боковых датчиков при условии, что третий датчик имеет центральное расположение (а), минимизация ошибки при помощи выбора моментов времени (б)

Таблица 4. Некоторые варианты оптимального расположения датчиков

Число обусловленности матрицы $\mathbf{A}$	$x_1, \text{ м}$	$x_2, \text{ м}$	$x_3, \text{ м}$	$y_1 = y_2 = y_3, \text{ м}$
9	-0.6	5.0	10.1	8
21	-2.6	5.1	12.2	6
39	-5.0	5.1	14.7	4
62	-7.4	5.1	17.2	2

Для решения задачи во временном пространстве необходимо иметь не менее трёх множеств значений измерения вектора $\mathbf{B}(t) = (\mathbf{B}_1(t), \mathbf{B}_2(t), \mathbf{B}_3(t))^T$, следующих друг за другом с одинаковым интервалом времени. В соответствии с (8) для последовательности измерений $\mathbf{B}(t)$ выберем четыре равноотстоящих во времени отсчета при одновременном условии возможной минимизации $err(t)$ (рис. 2б). Проведение измерений $\mathbf{B}(t)$ при помощи датчиков АМР типа сопряжено с приборной ошибкой измерения $\delta\mathbf{B}(t)$ порядка 0.05%. Учитывая возможное влияние дополнительных источников шумов положим $\delta\mathbf{B}(t) \approx 0.02$.

При моделировании данные измерения $\mathbf{B}(t)$ зашумлялись с помощью добавления нормально распределённого шума к значениям $\mathbf{B}(t)$. Для наглядности измеренные значения сведены в таблицу 5. На основании решения СЛАУ (3) определим мгновенные значения фазных токов $i_q(t)$, $q=1,2,3$ для четырёх выбранных ранее моментов времени t_n , $n=\overline{1,4}$ (табл. 6).

Таблица 5. Значения вектора индукции при расположении датчиков согласно табл. 4

$t_n (\times 10^{-3} \text{ с})$	$\mathbf{B}_1(t_n) (\times 10^{-5} \text{ Тл})$	$\mathbf{B}_2(t_n) (\times 10^{-5} \text{ Тл})$	$\mathbf{B}_3(t_n) (\times 10^{-5} \text{ Тл})$
3.68	$4.93 - j0.44$	$-4.40 - j4.36$	$-5.31 + j15.86$
8.70	$-5.32 + j4.77$	$5.13 - j0.76$	$-3.23 - j15.37$
13.68	$-4.89 + j0.10$	$4.08 + j4.45$	$5.07 - j15.66$
18.70	$5.16 - j4.90$	$-5.29 + j0.88$	$3.20 + j15.38$

Таблица 6. Результат решения обратной задачи во временной и частотной области

$t_n (\times 10^{-3} \text{ с})$	$i_1(t_n), \text{ А}$	$i_2(t_n), \text{ А}$	$i_3(t_n), \text{ А}$
3.68	$49.43 + j3.28$	$-90.58 - j6.92$	$40.39 + j3.41$
8.70	$-85.34 - j3.92$	$15.28 - j8.56$	$68.20 + j13.47$
13.68	$-40.65 + j0.93$	$101.48 + j4.80$	$-62.12 - j6.65$
18.70	$89.81 + j3.54$	$-9.84 + j5.72$	$-79.80 - j10.33$

Для удобства сравнения решений, полученных в частотной и во временной областях, результаты расчётов в каждом случае будем переводить в частотную область. Выполнив преобразование Фурье $\dot{I}_q(\omega) = \mathcal{F}\{i_q(t)\}$, получим комплексные величины $\dot{I}_q(\omega_0)$: $\dot{I}_1(\omega_0) = 41.31 + j88.75$; $\dot{I}_2(\omega_0) = -103.17 - j18.42$; $\dot{I}_3(\omega_0) = 63.15 - j68.97$, где ω_0 – основная частота системы электроснабжения, т.е. $\omega_0 = 100\pi$ рад/с.

Полная мощность для полученных значений фазных токов: $P = U \cdot (|\dot{I}_1(\omega_0)| + |\dot{I}_2(\omega_0)| + |\dot{I}_3(\omega_0)|)$, где $U = 110 \cdot 10^3 \text{ В}$ – номинальное напряжение воздушной ЛЭП, тогда $P \approx 1.1 \cdot 10^5 \cdot (97.9 + 104.8 + 93.5) = 32.6 \cdot 10^6 \text{ Вт}$. Сравнив результат вычисления $\dot{I}_q(\omega_0)$ с исходным значением токов получим величину относительной

ошибки: $\delta \dot{\mathbf{I}}(\omega) = \frac{\|\Delta \dot{\mathbf{I}}(\omega)\|}{\|\dot{\mathbf{I}}(\omega)\|} = 0.088$, тогда $P \approx (32.6 \pm 2.9) \cdot 10^6 \text{ Вт}$.

Решение в частотной области осуществляется на основе обработки выборки результатов измерения индукции магнитного поля за промежуток времени порядка 1...4 с. Для минимизации эффекта растекания спектра длительность интервала измерения должна быть кратна длительности одного периода ($T_0 = 20.0 \text{ мс}$) основной частоты $\omega_0 = 100\pi$ рад/с. Зададим длительность измерения 2 с, для чего выберем частоту дискретизации сигнала $f_s = 8192$, при этом число отсчетов преобразования Фурье $N = 16384$. Далее вычислим зашумленные значения $\mathbf{B}(t)$ и их образы в частотной области $\dot{\mathbf{B}}_p(\omega) = \mathcal{F}\{\mathbf{B}_p(t)\}$: $\dot{\mathbf{B}}_1(\omega_0) = 9.63 + j4.91 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$;

$\dot{\mathbf{B}}_2(\omega_0) = -5.37 - j9.73 \cdot 10^{-7}$ Тл; $\dot{\mathbf{B}}_3(\omega_0) = -20.43 + j18.79 \cdot 10^{-7}$ Тл, и для ω_0 найдём решение СЛАУ (9), определив комплексные токи $\dot{I}_q(\omega_0)$, $q=1,2,3$ в проводниках: $\dot{I}_1(\omega_0) = 40.31 + j91.53$; $\dot{I}_2(\omega_0) = -99.32 - j11.02$; $\dot{I}_3(\omega_0) = 58.99 - j80.51$. Преобразование сигнала и решение в частотном пространстве за счет усреднения большого массива исходных данных позволяет снизить влияние шума на результат решения.

Вычислим режим полной мощности для полученных значений: $P = 1.1 \cdot 10^5 \cdot (100.0 + 99.9 + 99.8) = 32.97 \cdot 10^6$ Вт. Сравнив результат вычисления $\dot{I}_q(\omega_0)$ с исходным значением токов получим величину относительной ошибки: $\delta \dot{\mathbf{I}}(\omega) = 0.0014$, тогда $P \approx (32.97 \pm 0.05) \cdot 10^6$ Вт, что примерно в 50 раз точнее значения найденного во временной области.

Приведем краткое решение задачи для двухцепной линии (рис. 3а) номинальным напряжением 330 кВ. Пусть проводники линии имеют координаты (x_q, y_q) в метрах: $((5.6, 9); (8.8, 15.5); (4.9, 23); (-8.8, 15.5); (-4.9, 23); (-5.6, 9))$. Найденные в результате применения генетического алгоритма оптимальные точки размещения датчиков магнитного поля представлены в табл. 7 и на изображении (рис. 3а).

Выберем для моделирования высоту расположения датчиков $y_q = 5$ м. Проведем расчет мощностного режима при помощи решения во временной области. В целях минимизации функции ошибки $err(t)$, выберем четыре равноотстоящих во времени измерения $\mathbf{B}(t_k)$ (рис. 3б). На основе измерений $\mathbf{B}(t_k)$ и матрицы $\mathbf{A}$, определим мгновенные значения фазных токов $i_q(t_k)$ и вычислим $\dot{I}_q(\omega) = \mathcal{F}\{i_q(t)\}$, получив комплексные значения $\dot{I}_q(\omega_0)$: $\dot{I}_1(\omega_0) = 134.90 + j342.99$; $\dot{I}_2(\omega_0) = -579.68 + j67.23$; $\dot{I}_3(\omega_0) = 692.97 - j380.70$; $\dot{I}_4(\omega_0) = -56.12 + j408.92$; $\dot{I}_5(\omega_0) = -523.71 - j256.18$; $\dot{I}_6(\omega_0) = 352.57 - j169.65$. Величина полной мощности для полученных значений токов: $P = U \sum_{q=1}^6 |\dot{I}_q(\omega_0)|$, где $U = 330 \cdot 10^3$ В – номинальное напряжение ВЛ. Тогда $P \approx 1.033 \cdot 10^9$ Вт. Относительная ошибка полученного решения, составляет: $\delta \dot{\mathbf{I}}(\omega) = 0.55$, тогда $P \approx (1.033 \pm 0.568) \cdot 10^9$ Вт.

Таблица 7. Некоторые варианты оптимального расположения датчиков

Число обусловленности матрицы $\mathbf{A}$	$x_1, \text{ м}$	$x_2, \text{ м}$	$x_3, \text{ м}$	$x_4, \text{ м}$	$x_5, \text{ м}$	$x_6, \text{ м}$	$y_q, q = 1...6$
260	-23.8	-9.8	-2.4	2.4	9.8	23.8	6.5
420	-27.4	-10.6	-2.7	2.7	10.6	27.4	5
620	-31.8	-11.6	-3.2	3.2	11.6	31.8	3.5
850	-37.3	-12.8	-3.7	3.7	12.8	37.3	2

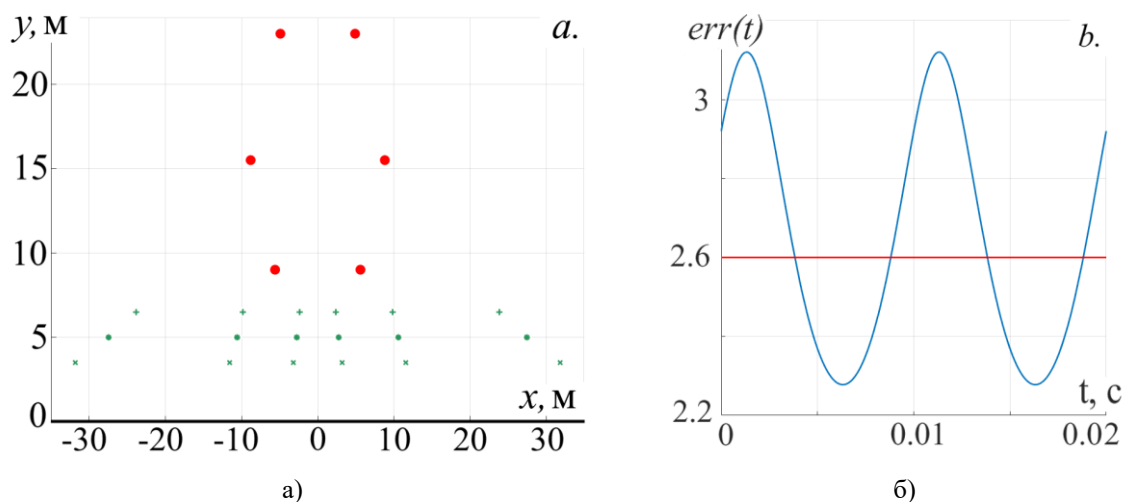


Рис. 3. Расположение проводников и варианты оптимального размещения датчиков магнитного поля для двухцепной ВЛ-330 кВ (а), график минимизации ошибки при помощи выбора моментов времени (б)

Для решения в частотной области выберем интервал времени измерения индукции магнитного поля в течение 2 с, частоту дискретизации $f_s = 8192$ Гц и длину выборки $N = 16384$. В частотной области получим $\dot{\mathbf{B}}_p(\omega) = \mathcal{F}\{\mathbf{B}_p(t)\}$ при величине ошибки измерения не более 2.0% от полезного сигнала. Выбрав из $\dot{\mathbf{B}}_p(\omega)$ значения для основной частоты системы электроснабжения ω_0 получим: $\dot{\mathbf{B}}_1(\omega_0) = 0.01 - j1.25 \cdot 10^{-6}$; $\dot{\mathbf{B}}_2(\omega_0) = 1.14 - j7.11 \cdot 10^{-6}$; $\dot{\mathbf{B}}_3(\omega_0) = 15.20 + j3.84 \cdot 10^{-6}$; $\dot{\mathbf{B}}_4(\omega_0) = 11.51 + j11.62 \cdot 10^{-6}$; $\dot{\mathbf{B}}_5(\omega_0) = -10.20 + j8.94 \cdot 10^{-6}$; $\dot{\mathbf{B}}_6(\omega_0) = -2.29 - j1.08 \cdot 10^{-6}$ Тл.

Проведем решение СЛАУ (3) для расположения датчиков согласно таблице 7 и вычислим значения токов проводников $\dot{\mathbf{I}}_q(\omega_0)$: $\dot{\mathbf{I}}_1(\omega_0) = 176.02 + j358.92$; $\dot{\mathbf{I}}_2(\omega_0) = -401.98 - j26.32$; $\dot{\mathbf{I}}_3(\omega_0) = 233.17 - j326.10$; $\dot{\mathbf{I}}_4(\omega_0) = 14.81 + j404.21$; $\dot{\mathbf{I}}_5(\omega_0) = -361.51 - j197.40$; $\dot{\mathbf{I}}_6(\omega_0) = 339.04 - j212.90$ А.

Полная мощность для полученных значений тока: $P \approx 0.799 \cdot 10^9$ Вт, при этом относительная ошибка решения составляет: $\delta \dot{\mathbf{I}}(\omega) = 0.019$, тогда $P \approx (0.799 \pm 0.015) \cdot 10^9$ Вт.

Обсуждение. Модельные исследования подтверждают применимость разработанного метода, достижимость малых величин ошибок при корректном выполнении измерений и достаточной точности измерительного оборудования. Для сравнительного анализа величин ошибки решения произведена статистическая оценка. Сбор статистики осуществлялся с помощью моделирования одно- и двух-цепной линий, причём исходные данные для расчёта матрицы $\mathbf{A}$ и вектора значений магнитных индукций $\mathbf{B}(t)$ зашумлялись аддитивным шумом с нормальным распределением, а значения параметров распределения выбирались на основании характерных ошибок используемого оборудования. Так, для измерения линейных размеров и формирования матрицы $\mathbf{A}$ выбраны значения математического ожидания шума $m_A = 0$, стандартного отклонения $\sigma_A = 0.5 \cdot 10^{-3}$ м при условии, что доверительный интервал 99,7% образован областью $(m_A - 3\sigma; m_A + 3\sigma)$.

Для зашумления значений магнитной индукции $\mathbf{B}(t)$, значения математического ожидания шума $m_B = 0$, стандартного отклонения $\sigma_B = 2.1 \cdot 10^{-8}$ Тл для одноцепной линии и $\sigma_B = 1.5 \cdot 10^{-7}$ Тл для двух-цепной линии. После проведения 1250 экспериментов для каждого случая обобщим полученные результаты в виде гистограммы (рис. 4).

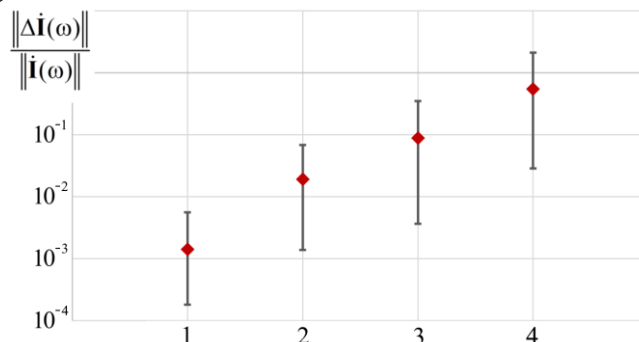


Рис. 4. Величины относительной погрешности вычисления токов на основе разработанных методов: решения в частотной области для одноцепной (1) и двухцепной линии (2); решения во временной области для одноцепной (3) и двухцепной линии (4)

Применение метода решения в частотной области позволяет значительно снизить влияние случайных шумов, однако результат решения может быть подвержен влиянию систематических ошибок, величина которых не снижается в ходе усреднения. С другой стороны, решение во временной области позволяет определить мгновенные значения токов, что может быть полезно, например, для детектирования аварийных режимов.

Выводы. Разработан метод бесконтактного детектирования токов и идентификации мощностных режимов воздушных линий электропередач. Произведено математическое моделирование и исследованы численные примеры. Метод применим с достаточно высокой точностью для одно- и двух-цепных линий электропередач. Наиболее точное решение удаётся получить при решении задачи в частотном пространстве. Так, при характерных значениях ошибок исходных данных, идентификация токов в частотном пространстве была проведена с достаточно высокой точностью: для одноцепной линии ошибка решения составила 0.14%, для двухцепной линии – 1.9%.

Добиться указанных результатов позволило:

1. применение лазерных дальномеров обеспечивающих малое значение ошибки измерения расстояний;
2. высокоточное моделирование магнитного поля длинной линии с применением метода зеркальных изображений;
3. фильтрация шума при регистрации магнитного поля длинной линии за счёт преобразования в частотную область и последующей частотной селекции.

Практические измерения могут дать несколько большие ошибки, которые могут возникнуть из-за: изменения провисания проводников длинной линии в результате температурных флуктуаций; слоистой неоднородности почвы, не позволяющей с достаточной точностью использовать метод зеркальных изображений; шумов электронных самописцев, в том числе при недостаточном числе разрядов АЦП. Для устранения указанных возможных причин авторами предусмотрены: метод расчёта дополнительной поправки провисания проводников длинной линии в зависимости от температурных флуктуаций; рекомендуется использовать АЦП не менее 16 бит.

В случае выраженной слоистости почв, в том числе значительной солончатости, следует применить более точные методы моделирования магнитных полей длинных линий с учётом теллурических токов. При этом авторы считают, что даже в случае снижения точности определения токов до (10...15)% решение, будет достаточным для задачи оценочной идентификации мощностных режимов длинной линии необходимого для большинства практических приложений.

Отличительной особенностью предлагаемого метода является бесконтактный способ измерения, с расположением датчиков магнитного поля в безопасной зоне под линией электропередач с возможностью полностью автоматического мониторинга в круглосуточном режиме.

Авторы считают, что предлагаемый метод найдёт применение в задачах электротехнического мониторинга мощностных режимов работы воздушных линий, в том числе в приложениях информационной безопасности и информационного противоборства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жаринов, И. О. Информационно-аналитическое обеспечение в решении задачи дискретного экономического управления бизнесом индустрии 4.0. / И. О. Журавлев // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. – 2022. – № 3. – С. 43-52. – DOI 10.18101/2304-4446-2022-3-43-52.
2. Condition monitoring and fault diagnosis of power transformer based on non-invasive measurement / M. Youssef [et al.] // Scientific Reports. – 2025. – V. 15, No. 1. – А. 32123. – DOI 10.1038/s41598-025-14242-2.
3. A magnetic measurement-based contactless method for current/sag monitoring in overhead lines considering practical engineering conditions / Y. Mai [et al.] // Measurement. – 2025. – V. 257. – А. 118779. – DOI 10.1016/j.measurement.2025.118779.
4. Методы бесконтактной регистрации информационных сигналов для аудита информационной безопасности систем и сетей электроснабжения / А. Ю. Гришенцев, С. А. Арустамов, Н. С. Кармановский [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23, № 6. – С. 1233-1241. – DOI 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1233-1241. – EDN VJJZAK.
5. Макаренко, С. И. Аудит безопасности критической информационной инфраструктуры: учебное пособие / С. И. Макаренко. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. – 122 с.
6. Защита канала широкополосной связи с применением ортогональных шумоподобных сигнальных символов / А. Ю. Гришенцев, С. А. Арустамов, А. Г. Коробейников, О. В. Козин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 280-291. – DOI 10.17586/2226-1494-2019-19-2-280-291. – EDN AQQVFW.
7. Кузьмин, П. С. Неинтрузивный мониторинг нагрузок: эффекты внедрения и перспективы распространения / П. С. Кузьмин // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 306-319. – DOI 10.17747/2618-947X-2019-4-306-319. – EDN BPIHLP.
8. Новобрицкий, В. А. Оптимизация размещения датчиков магнитного поля для реализации селективной защиты двухцепной воздушной линии электропередачи / В. А. Новобрицкий // Электротехнические системы и комплексы. – 2024. – № 4(65). – С. 31-39. – DOI 10.18503/2311-8318-2024-4(65)-31-39. – EDN OQCLFK.
9. Свойства и атрибуты сетей электроснабжения как факторы, демаскирующие характеристики объектов, потребляющих и генерирующих электроэнергию / А. Г. Коробейников, А. Ю. Гришенцев, С. А. Арустамов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 5. – С. 303-306. – EDN LBSVSG.
10. Data exfiltration through electromagnetic covert channel of wired industrial control systems / S. Sachintha [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – V. 13, No. 5. – А. 2928. – DOI 10.3390/app13052928.
11. Houicher, S. Calculation of the Magnetic Field in the Vicinity of the Overhead Transmission Lines / S. Houicher, R. Djekidel // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – P. 1529–1538. – DOI 10.1007/978-3-030-73882-2_139.
12. Теоретические основы электротехники. Том 3: 4-е изд. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2006. – 377 с.

13. Budnik, K. Contribution to studies on calculation of the magnetic field under power lines. / K. Budnik, W. Machczynski // *European Transactions on Electrical Power*. – 2006. – Vol. 16, No. 4. – P. 345–364. – DOI 10.1002/etep.90.
14. Вержбицкий, В. М. Численные методы / В. М. Вержбицкий. – М.: ООО «ИД Оникс 21 век», 2005. – 432 с.
15. Биоинспирированные методы в оптимизации: монография / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, П. В. Сороколетов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 384 с.
16. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 283 с.
17. Nasserredine, M. Soil resistivity structure and its implication on the pole grid resistance for transmission lines / M. Nasserredine, J. Rizk, G. Nasserddine // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 2013. – V. 7, No 35. – P. 1–10.
18. Early study of magnetic permeability and magnetic susceptibility of peat in Ogan Komering Ilir, South Sumatera, Indonesia / M. F. Anisah, A. Purwandani, D. Nugroho, L. Sumargana // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – V. 500, No. 1. – Art. 012025. – DOI 10.1088/1755-1315/500/1/012025.
19. Bosch GLM 50-27 CG Professional Руководство по эксплуатации. – URL: https://media.vn.bosch-pt.com/binary/ocsmmedia/optimized/full/o416915v21_160992A8KF_202305.pdf (дата обращения 22.02.2026).
20. Distance Laser Sensor DLS-C 15 Technical Reference Manual. – URL: https://dimetix.com/wp-content/uploads/2016/08/DLS_FLS_C_TechnicalManual_V204_en.pdf (дата обращения 22.02.2026).
21. Leica DISTO X4 Product Data Sheet. – URL: https://shop.leica-geosystems.com/sites/default/files/2022-01/Leica%20DISTO%20X4%20data-sheet_2201_V1.0_EN.pdf (дата обращения 22.02.2026).
22. Лазерный 3D сканер Trimble X7. – URL: https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-958093/X7_UserGde_4A_61341_rus.pdf (дата обращения 22.02.2026).
23. Fluxgate Magnetometers – URL: <https://magnetometer.com/wp-content/uploads/Fluxgate-Magnetometers-White-Paper.pdf> (дата обращения 22.02.2026).
24. Ripka, P. Contactless measurement of electric current using magnetic sensors / P. Ripka // *Tm – Technisches Messen*. – 2019. – V. 86, No. 10. – P. 586–598. – DOI 10.1515/teme-2019-0032.
25. A1324 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs. Allegro MicroSystems. – URL: <https://allegromicro.com/~media/files/datasheets/a1324-5-6-datasheet.ashx> (дата обращения 22.02.2026).
26. 1 and 2- axis magnetic sensors HMC1001/1002/1021/1022 datasheet. Honeywell. – URL: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/aero/en-us/products/navigation-and-sensors/sensors/low-field-high-precision-linear-1-and-2-axis-analog-magnetic-sensors/documents/hon-aero-1-and-2-axis-magnetic-sensors.pdf> (дата обращения 22.02.2026).
27. MMC5983MA AMR Magnetometer datasheet. MEMSIC Semiconductor. – URL: <https://www.memsic.com/magnetometer-5> (дата обращения 22.02.2026).
28. DRV421 Integrated Magnetic Fluxgate Sensor datasheet. Texas Instruments. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv421.pdf> (дата обращения 22.02.2026).

REFERENCES LIST

1. Zharinov, I. O. Informationsno-analiticheskoe obespechenie v reshenii zadachi diskretnogo ekonomicheskogo upravleniya biznesom industrii 4.0. / I. O. Zhuravlev // *Vestnik Buriatskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika i menedzhment*. – 2022. – № 3. – S. 43–52. – DOI 10.18101/2304-4446-2022-3-43-52.
2. Condition monitoring and fault diagnosis of power transformer based on non-invasive measurement / M. Youssef [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – V. 15, No. 1. – A. 32123. – DOI 10.1038/s41598-025-14242-2.
3. A magnetic measurement-based contactless method for current/sag monitoring in overhead lines considering practical engineering conditions / Y. Mai [et al.] // *Measurement*. – 2025. – V. 257. – A. 118779. – DOI 10.1016/j.measurement.2025.118779.
4. Metody beskontaktnoi registratsii informatsionnykh signalov dlia audita informatsionnoi bezopasnosti sistem i setei elektrosnabzheniya / A. Iu. Grishentsev, S. A. Arustamov, N. S. Karmanovskii [i dr.] // *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. – 2023. – T. 23, № 6. – S. 1233–1241. – DOI 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1233-1241. – EDN VJJZAK.
5. Makarenko, S. I. Audit bezopasnosti kriticheskoi informatsionnoi infrastruktury: uchebnoe posobie / S. I. Makarenko. – SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2023. – 122 s.
6. Zashchita kanala shirokopolosnoi svyazi s primeneniem ortogonalnykh shumopodobnykh signalnykh simvolov / A. Iu. Grishentsev, S. A. Arustamov, A. G. Korobeinikov, O. V. Kozin // *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. – 2019. – T. 19, № 2. – S. 280–291. – DOI 10.17586/2226-1494-2019-19-2-280-291. – EDN AQQVFW.

7. Kuzmin, P. S. Neintruzivnyi monitoring nagruzki: efekty vnedreniia i perspektivy rasprostraneniia / P. S. Kuzmin // Strategicheskie resheniia i risk-menedzhment. – 2019. – T. 10, № 4. – S. 306-319. – DOI 10.17747/2618-947X-2019-4-306-319. – EDN BPIHLP.
8. Novobritskii, V. A. Optimizatsiia razmeshcheniia datchikov magnitnogo polia dlia realizatsii selektivnoi zashchity dvukhtsepoi vozdukhnoi linii elektropredachi / V. A. Novobritskii // Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы. – 2024. – № 4(65). – S. 31-39. – DOI 10.18503/2311-8318-2024-4(65)-31-39. – EDN OQCLFK.
9. Svoistva i atributy setei elektrosnabzheniia kak faktory, demaskiruiushchie kharakteristiki obiektov, potreblaiushchikh i generiruiushchikh elektroenergiu / A. G. Korobeinikov, A. Iu. Grishentsev, S. A. Arustamov [i dr.] // Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzhia. – 2023. – № 5. – S. 303-306. – EDN LBSVSG.
10. Data exfiltration through electromagnetic covert channel of wired industrial control systems / S. Sachintha [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – V. 13, No. 5. – A. 2928. – DOI 10.3390/app13052928.
11. Houicher, S. Calculation of the Magnetic Field in the Vicinity of the Overhead Transmission Lines / S. Houicher, R. Djekidel // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – P. 1529–1538. – DOI 10.1007/978-3-030-73882-2_139.
12. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Tom 3: 4-e izd. / K. S. Demirchian, L. R. Neiman, N. V. Korovkin, V. L. Chechurin. – SPb.: Piter, 2006. – 377 s.
13. Budnik, K. Contribution to studies on calculation of the magnetic field under power lines. / K. Budnik, W. Machczynski // European Transactions on Electrical Power. – 2006. – Vol. 16, No. 4. – P. 345–364. – DOI 10.1002/etep.90.
14. Verzhbitskii, V. M. Chislennye metody / V. M. Verzhbitskii. – M.: OOO «ID Oniks 21 vek», 2005. – 432 s.
15. Bioinspirirovannye metody v optimizatsii: monografiia / L. A. Gladkov, V. V. Kureichik, V. M. Kureichik, P. V. Sorokoletov. – M.: FIZMATLIT, 2009. – 384 s.
16. Tikhonov, A. N. Metody resheniia nekorrektnykh zadach / A. N. Tikhonov, V. Ia. Arsenin. – M.: Nauka, 1979. – 283 s.
17. Nassereddine, M. Soil resistivity structure and its implication on the pole grid resistance for transmission lines / M. Nassereddine, J. Rizk, G. Nasserddine // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2013. – V. 7, No 35. – P. 1–10.
18. Early study of magnetic permeability and magnetic susceptibility of peat in Ogan Komering Ilir, South Sumatera, Indonesia / M. F. Anisah, A. Purwandani, D. Nugroho, L. Sumargana // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – V. 500, No. 1. – Art. 012025. – DOI 10.1088/1755-1315/500/1/012025.
19. Bosch GLM 50-27 CG Professional Руководство по эксплуатации. – URL: https://media.vn.bosch-pt.com/binary/ocsmedia/optimized/full/o416915v21_160992A8KF_202305.pdf (data obrashcheniia 22.02.2026).
20. Distance Laser Sensor DLS-C 15 Technical Reference Manual. – URL: https://dimetix.com/wp-content/uploads/2016/08/DLS_FLS_C_TechnicalManual_V204_en.pdf (data obrashcheniia 22.02.2026).
21. Leica DISTO X4 Product Data Sheet. – URL: https://shop.leica-geosystems.com/sites/default/files/2022-01/Leica%20DISTO%20X4%20data-sheet_2201_V1.0_EN.pdf (data obrashcheniia 22.02.2026).
22. Lazernyi 3D skaner Trimble X7. – URL: https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-958093/X7_UserGde_4A_61341_rus.pdf (data obrashcheniia 22.02.2026).
23. Fluxgate Magnetometers – URL: <https://magnetometer.com/wp-content/uploads/Fluxgate-Magnetometers-White-Paper.pdf> (data obrashcheniia 22.02.2026).
24. Ripka, P. Contactless measurement of electric current using magnetic sensors / P. Ripka // Tm – Technisches Messen. – 2019. – V. 86. No. 10. – P. 586–598. – DOI 10.1515/teme-2019-0032.
25. A1324 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs. Allegro MicroSystems. – URL: <https://allegromicro.com/~media/files/datasheets/a1324-5-6-datasheet.ashx> (data obrashcheniia 22.02.2026).
26. 1 and 2- axis magnetic sensors HMC1001/1002/1021/1022 datasheet. Honeywell. – URL: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/aero/en-us/products/navigation-and-sensors/sensors/low-field-high-precision-linear-1-and-2-axis-analog-magnetic-sensors/documents/hon-aero-1-and-2-axis-magnetic-sensors.pdf> (data obrashcheniia 22.02.2026).
27. MMC5983MA AMR Magnetometer datasheet. MEMSIC Semiconductor. – URL: <https://www.memsic.com/magnetometer-5> (data obrashcheniia 22.02.2026).
28. DRV421 Integrated Magnetic Fluxgate Sensor datasheet. Texas Instruments. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv421.pdf> (data obrashcheniia 22.02.2026).

Поступила в редакцию 27.02.2026 г., рекомендована к печати 18.03.2026 г.

METHOD FOR IDENTIFYING CURRENTS IN OVERHEAD LINE CONDUCTORS BASED ON MAGNETIC FIELD SENSOR DATA

Goroshkov V.A., Korovkin N.V., Grishentsev A.IU., Gerasimov I.V., Wenlong Yi, Kasianov A.V.

The subject of this study is the development of a non-contact method for identifying currents in the conductors of an overhead power line based on magnetic field measurements taken in electrically safe vicinity of the overhead line. A method is proposed for solving the inverse problem of current identification in a long line based on the results of precise magnetic field measurements using modern instrumentation and subsequent processing of the measurement data using magnetic field modeling by the mirror image method and frequency selectivity. The problem of identifying currents is solved by calculating the roots of a system of linear algebraic equations in the time or frequency domain. It is possible to organize continuous, fully automatic monitoring. Main result is the development of a method for non-contact identification of currents in the conductors of an overhead power line and the numerical simulation of several examples. Practical application areas for the method include technical supervision, environmental monitoring, information warfare, and information security.

Keywords: identification of currents in overhead lines, power modes, power lines, magnetic field, information security, information warfare.

Горошков Вячеслав Александрович

аспирант высшей школы высоковольтной энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: gorosvia@ya.ru

Goroshkov Viacheslav Aleksandrovich

Postgraduate student at Institute of Energy of Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russian Federation, Saint Petersburg.

Коровкин Николай Владимирович

действительный член академии электротехнических наук, доктор технических наук, профессор, профессор высшей школы высоковольтной энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

Korovkin Nikolai Vladimirovich

Full Member of the Academy of Electrical Sciences, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Institute of Energy of Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russian Federation, Saint Petersburg.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

Гришенцев Алексей Юрьевич

член-корреспондент академии электротехнических наук, доктор технических наук, доцент, доцент факультета безопасности информационных технологий ФГБОУ ВО «Университет ИТМО», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: agrishentsev@yandex.ru

Grishentsev Aleksei IUrevich

Corresponding Member of the Academy of Electrical Sciences, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Faculty of Secure Information Technologies of ITMO University, Russian Federation, Saint Petersburg.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1373-0670>

Герасимов Игорь Владимирович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: ivgerasimov-45@yandex.ru

Gerasimov Igor Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of CAD Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Russian Federation, Saint Petersburg.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0965-1438>

И Вэньлун

кандидат технических наук, доцент, доцент школы программного обеспечения Сельскохозяйственного университета Цзянси, Китай, Наньчан.
E-mail: yiwenlong@jxau.edu.cn

Wenlong Yi

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at School of Software of Jiangxi Agricultural University, China, Nanchang.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9266-3498>

Касьянов Александр Владимирович

Аспирант ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: kasjanov@inbox.ru

Kasianov Aleksandr Vladimirovich

Postgraduate Student of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Russian Federation, Saint Petersburg.

АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКИХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2026 Копейка Д.В., Бирюков А.Б.

В работе представлены результаты анализа фактических теплотехнических характеристик ограждающих конструкций групп жилых зданий и зданий общеобразовательных учреждений. Обобщенные показатели сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и удельных теплозащитных характеристик были сопоставлены с существующими нормативными показателями. Проанализирована степень влияния различных элементов ограждающих конструкций на общие тепловые потери здания. Сформулированы выводы о текущем состоянии ограждающих конструкций и необходимости комплексной термомодернизации.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, сопротивление теплопередаче, теплозащитные свойства, тепловые потери, удельная теплозащитная характеристика.

Введение. Основная доля тепловых потерь зданий – это теплопотери теплопередачей через ограждающие конструкции. Теплозащитные характеристики ограждающих конструкций во многом определяют общую энергетическую эффективность зданий. Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций – один из ключевых элементов при расчете тепловой нагрузки здания.

Для нашего региона характерно преобладание зданий советского периода, для которого был характерен плановый подход в строительстве (типовые серии панельного домостроения), а также достаточно низкие (по современным меркам) требования к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций и эффективности инженерных систем зданий. Помимо того, что требования к энергоэффективности зданий и сооружений существенно возросли, теплозащитные характеристики существующих зданий ухудшались вследствие износа.

Для нашего региона ситуация усугубляется вследствие многолетней нестабильной экономической и политической ситуации, из-за чего вопросам энергоэффективности не уделялось должного внимания. Отдельного внимания заслуживает вопрос соответствия теплозащитных характеристик зданий существующим стандартам Российской Федерации [1, 2].

Вопрос повышения энергоэффективности не ограничивается лишь реконструкцией и модернизацией конкретного здания. При комплексном и массовом подходе, реконструкция зданий приводит к изменению параметров работы всей системы централизованного теплоснабжения. Начиная от изменения фактической тепловой нагрузки и заканчивая изменением параметров работы системы распределения теплоносителя (вследствие реконструкции инженерных систем здания, установки ИТП и др.) [3-5]. Исходя из этого, существует необходимость предварительной оценки энергосберегающего потенциала существующих зданий различного назначения.

Результаты работы, представленные в статье, получены в ходе выполнения НИР в рамках Госзадания (FRRF-2024-0011).

Целью исследования является анализ соответствия теплозащитных характеристик ограждающих конструкций существующим нормативным требованиям, а также определение энергосберегающего потенциала на примере ряда жилых зданий и зданий общеобразовательных учреждений.

Описание объектов исследования. При проведении исследования использовались данные о 20-ти зданиях, из которых 12 – жилые здания, 6 – здания общеобразовательных учреждений. Все здания расположены на территории Донецкой Народной Республики. Жилые здание - 4, 5 и 9-ти этажные (преимущественно типовых серий) с кирпичными и панельными наружными стенами. Здания общеобразовательных учреждений преимущественно 3-х этажные с кирпичными наружными стенами. Используемые при анализе данные включали в себя инвентарные дела, технические паспорта зданий, а также опросные листы, заполненные на основе визуального обследования. Централизованные энергосберегающие мероприятия в исследуемых зданиях ранее не проводились, кроме замены окон (однако в большинстве случаев установлены однокамерные стеклопакеты без низкоэмиссионных покрытий).

В ходе обследования зданий были определены не только технические характеристики, но также ряд проблем, которые также негативно сказываются на общей энергетической эффективности зданий.

И для жилых зданий, и для зданий общеобразовательных учреждений характерны дефекты ограждающих конструкций: трещины, разрушение цоколя, разрушение межпанельных швов, опадание штукатурки и т.д. При замене окон на пластиковые характерно отсутствие утепления откосов. Во многих случаях наблюдается неудовлетворительное состояние гидроизоляции кровли. В некоторых жилых зданиях присутствует локальное утепление отдельных квартир пенопластом и пенополистиролом (самовольное утепление без согласия контролирующих органов запрещено законодательства РФ).

Во всех зданиях отсутствует современное качественно-количественное регулирование параметров теплоносителя на вводе (ИТП), установлены устаревшие гидроэлеваторы. Состояние изоляции трубопроводов системы отопления в техподпольях неудовлетворительное (в некоторых случаях изоляция отсутствует).

В целом, здания характеризуется неудовлетворительным состоянием ограждающих конструкций и инженерных систем.

Анализ теплозащитных свойств ограждающих конструкций рассматриваемых зданий. На основании [1, 2] были определены требуемые значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций (таблица 1).

Таблица 1. Требуемое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций

Город	Тип здания	Требуемое сопротивление теплопередаче R_{req} , м ² ·°C/Вт					
		Стены	Окна	Двери	Совмещенные кровли	Чердачные перекрытия	Полы по грунту
Донецк	Жилые	2.64	0.60	0.67	3.97	3.50	3.50
	Школа	2.70	0.60	0.67	4.06	3.58	3.58

На рис. 1-2 отображены усредненные показатели сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций рассматриваемых жилых зданий и зданий общеобразовательных учреждений, а также требуемые значения.

Анализ данных рис. 1-2 показывает, что для всех типов рассматриваемых зданий фактическое значение сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций ниже нормативных показателей.

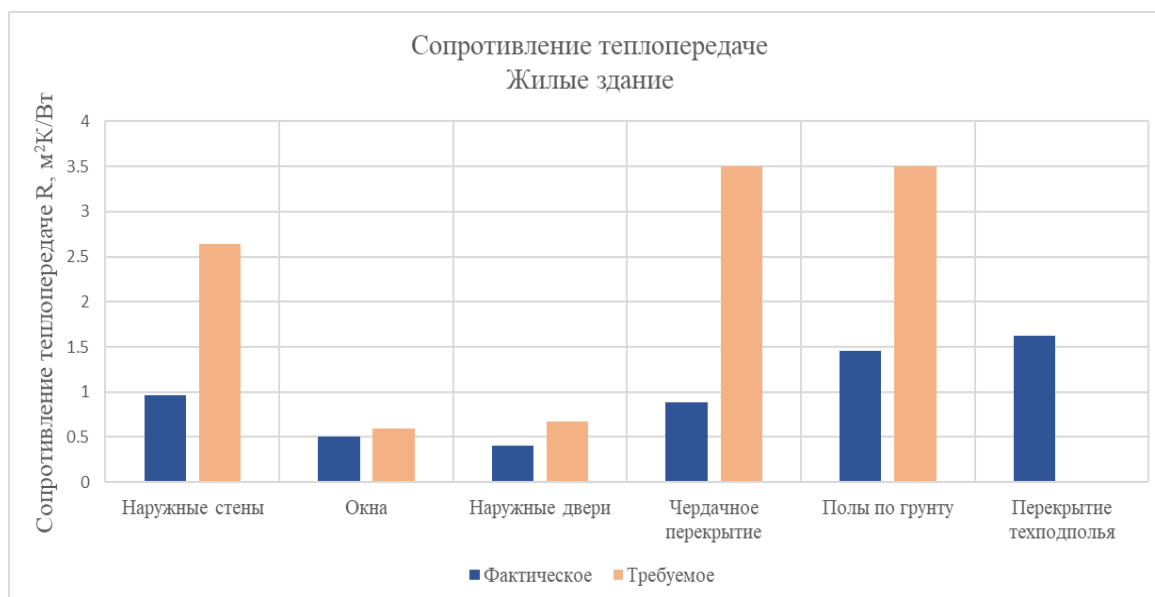


Рис. 1. Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций жилых здания

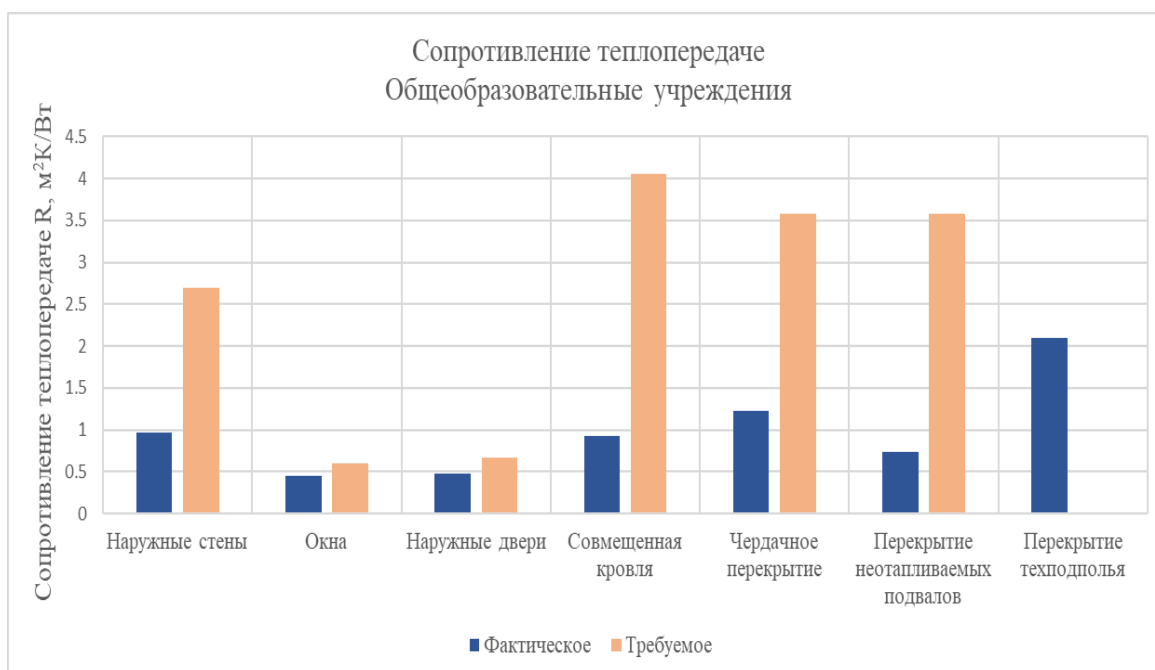


Рис. 2. Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций общеобразовательных учреждений

Для анализа общей эффективности тепловой защиты зданий используется удельная теплозащитная характеристика $k_{об}$, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ [1]. Фактическое значение удельной отопительной характеристики не должно превышать нормативное значение, определяемое в зависимости от градусо-суток отопительного периода и отапливаемого объема здания. На рис. 3 отображены усредненные значения фактической и нормируемой теплозащитной характеристики для обследуемых зданий.

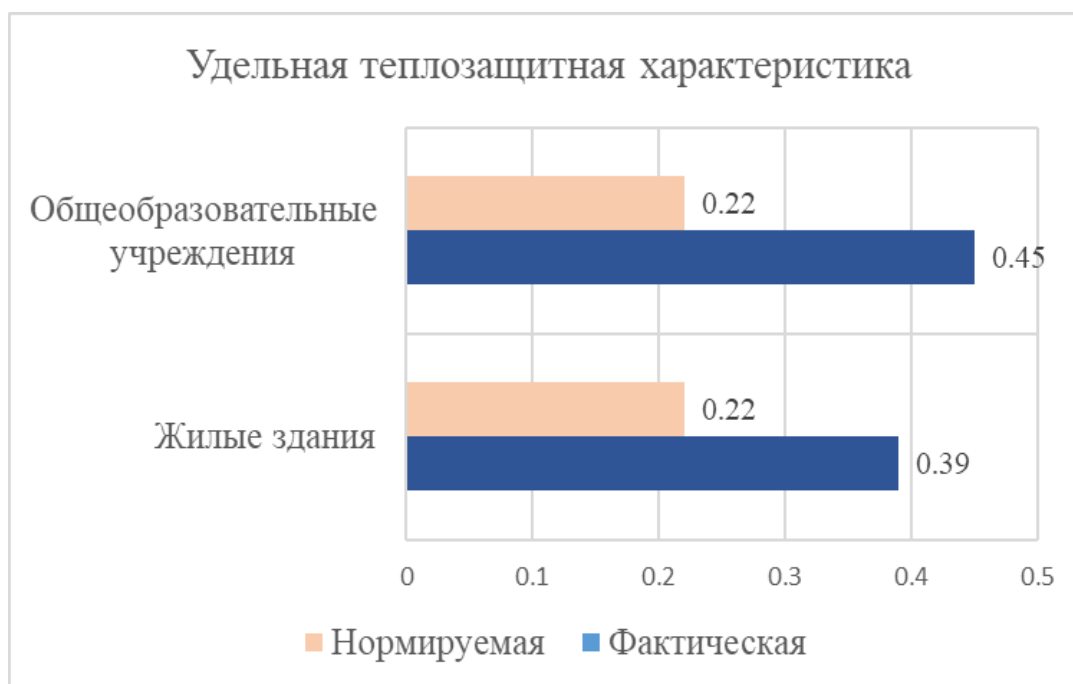


Рис. 3. Удельная теплозащитная характеристика

На рис. 4 и рис. 5 в процентном соотношении отображены доли потерь через отдельные элементы ограждающих конструкций для исследуемых зданий. Анализ данных рис. 4 и рис. 5 показывает преобладание тепловых потерь через наружные стены и окна (несмотря на полную или частичную замену окон на пластиковые).



Рис. 4. Процентное соотношение тепловых потерь в обследуемых жилых зданиях



Рис. 5. Процентное соотношение тепловых потерь в обследуемых зданиях общеобразовательных учреждений

Выводы. В результате проведенного исследования теплотехнических характеристик ограждающих конструкций групп жилых зданий и зданий общеобразовательных учреждений можно сделать следующие выводы:

- определена структура тепловых потерь через ограждающие конструкции для зданий различного типа и назначения;
- при существенном преобладании тепловых потерь через наружные стены, потери через светопрозрачные конструкции, несмотря на частичную или полную замену устаревших деревянных окон на пластиковые, тем не менее, также существенны. Это объясняется тем, что в большинстве случаев, при замене окон использовались низкоэффективные стеклопакеты;
- тепловые потери через конструкции покрытий, перекрытий и совмещенных кровель также существенны и их удельная составляющая в значительной степени зависит от этажности здания;
- значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций обследуемых зданий не соответствуют существующим нормативным значениям;
- значения удельных теплозащитных характеристик обследуемых зданий не соответствуют нормативным значениям;
- несмотря на полную или частичную замену старых деревянных окон на пластиковые, сопротивление теплопередаче окон не соответствует нормативным значениям.

В целом, результаты обследования зданий и расчетов теплозащитных характеристик указывают на острую необходимость в модернизации ограждающих конструкций зданий нашего региона.

При этом недостаточно лишь утепления наружных стен или замены окон. Необходим комплексный подход, учитывающий тепловые потери и фактические теплозащитные свойства для всех типов ограждающих конструкций. Отдельное внимание следует уделить термомодернизации покрытий и перекрытий. Несмотря на техническую сложность, подобные мероприятия также обладают существенным энергосберегающим потенциалом, в особенности для зданий с малой этажностью. В некоторых случаях необходимо рассмотреть возможность утепления цоколя с заглублением в грунт.

Только в случае комплексного подхода к энергетическому обследованию зданий различного типа и назначения можно достичь максимального энергосберегающего эффекта. Особенно это актуально при проведении не только термомодернизации ограждающих конструкций, но и при реконструкции системы отопления в здании. Важным аргументом в пользу комплексных энергетических обследований является несоответствие существующих тарифов на отопление себестоимости производства тепловой энергии и стоимости теплозащитных материалов и технологий, что ставит под вопрос рентабельность ряда энергосберегающих мероприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СП 50.13330.2024. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: утв/ приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 15 мая 2024 г. №327/пр; введен с 16.06.2024.
2. СП 131.13330.2025. Строительная климатология: утв. приказом Минстроя России от 08.08.2025 №470/пр; введен с 09.09.2025
3. Гашо, Е. Г. Особенности проведения работ по энергосбережению в существующем жилищном фонде города / Е. Г. Гашо, А. В. Коваль, И. Р. Саубанов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 3(67). – С. 7-10. – EDN NUFKZL.
4. Гашо, Е. Г. Как повысить энергоэффективность капремонта зданий в ЖКХ и в бюджетной сфере / Е. Г. Гашо, А. Н. Пирогов, М. В. Степанова // Главный энергетик. – 2016. – № 5. – С. 15-26. – EDN VVNKMR.
5. Гашо, Е. Г. Энергоэффективность - важнейшая составляющая капремонта / Е. Г. Гашо, А. Н. Пирогов, М. В. Степанова // «Энергосбережение». – 2014. – №7. – С. 18–25.

REFERENCES LIST

1. SP 50.13330.2024. Svod pravil. Teplovaia zashchita zdani. Aktualizirovannaia redaktsiia SNiP 23-02-2003: utv/ prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii ot 15 maia 2024 g. №327/pr; vveden s 16.06.2024.
2. SP 131.13330.2025. Stroitelnaia klimatologiya: utv. prikazom Minstroia Rossii ot 08.08.2025 №470/pr; vveden s 09.09.2025
3. Gasho, E. G. Osobennosti provedeniia rabot po energosberezheniiu v sushchestvuiushchem zhilishchnom fonde goroda / E. G. Gasho, A. V. Koval, I. R. Saubanov // Energosberezhenie i vodopodgotovka. – 2011. – № 3(67). – S. 7-10. – EDN NUFKZL.
4. Gasho, E. G. Kak povysit energoeffektivnost kapremonta zdani v ZhKKh i v biudzhetnoi sfere / E. G. Gasho, A. N. Pirogov, M. V. Stepanova // Glavnyi energetik. – 2016. – № 5. – S. 15-26. – EDN VVNKMR.
5. Gasho, E. G. Energoeffektivnost - vazhneishaia sostavliaiushchaia kapremonta / E. G. Gasho, A. N. Pirogov, M. V. Stepanova // «Energosberezhenie». – 2014. – №7. – S. 18–25.

Поступила в редакцию 18.03.2026 г., рекомендована к изданию 08.04.2026 г.

ANALYSIS OF THE ACTUAL THERMAL PERFORMANCE OF BUILDING ENVELOPES IN
BUILDINGS OF VARIOUS TYPES

Kopeika D.V., Biriukov A.B.

The paper provides the results of an analysis of the actual thermal performance of building envelopes in groups of residential buildings and general education school buildings. Generalized indicators of the thermal resistance of envelope structures and the specific heat-loss characteristics were compared with the required values. The influence of different elements of building envelopes on the overall heat losses of buildings was analyzed. Conclusions are drawn regarding the current condition of the building envelopes and the need for comprehensive thermal modernization.

Keywords: building envelope, thermal resistance, thermal insulation performance, heat losses, specific heat-loss characteristic.

Копейка Денис Вадимович

кандидат технических наук, научный сотрудник
молодежной научной лаборатории
«Приборостроение и станкостроение»
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: benj72008@rambler.ru

Kopeika Denis Vadimovich

Candidate of Technical Sciences, Researcher at the
Youth Scientific Laboratory «Instrumentation and
Machine Tool Engineering» of Donetsk National
Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой технической теплофизики, проректор
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.donntu@mail.ru

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the
Department of Technical Thermophysics, Vice-rector
of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8146-2017>

СЕТЕВЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ КУЗБАССА

© 2026 Паскарь И.Н., Кудряшов Д.С.

В статье проанализировано состояние энергосистемы Кемеровской области - Кузбасса по материалам Схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2026-2031 годы, далее СИПР, и уточняющей статистике за 2025 год. Выявлены ключевые сетевые ограничения надежности в сетях 110-220 кВ, проявляющиеся при проверке по критерию N-1, то есть при расчетной оценке сохранения допустимого режима после отключения одного элемента сети, по перегрузкам и уровням напряжения. Обоснован комплекс приоритетных мероприятий по развитию линий электропередачи и подстанционного комплекса, включая усиление транзитов, реконструкцию узлов 500, 220 и 110 кВ и создание нового центра питания южного энергорайона. Показано, что реализация предложенных решений снижает перегрузки, стабилизирует напряжение и уменьшает потребность в аварийном ограничении нагрузки.

Ключевые слова: энергосистема, электрические сети 110-220 кВ, надёжность электроснабжения, критерий N-1, подстанции, линии электропередачи, дефицит мощности, режимы работы, СИПР, энергосистема Кузбасса.

Введение. Энергосистема Кемеровской области – Кузбасса относится к числу наиболее энергоёмких территориальных энергосистем Российской Федерации и обеспечивает электроснабжение угледобывающей, металлургической, химической промышленности, железнодорожного транспорта, а также коммунально-бытового сектора. Высокая концентрация энергоёмких потребителей при значительной территориальной протяжённости региона и неравномерном размещении источников генерации формируют повышенные требования к надёжности и пропускной способности электрических сетей.

Современное состояние энергосистемы Кузбасса характеризуется совмещением следующих факторов: высоким уровнем физического и морального износа основного оборудования тепловых электростанций и сетевого комплекса, неоднородной динамикой максимума нагрузки и годового электропотребления в 2020-2025 гг., локальной концентрацией новых центров нагрузки, а также наличием сетевых ограничений в электрических сетях 110-220 кВ. Несмотря на формально достаточный уровень установленной мощности, в ряде энергорайонов формируется структурный дефицит мощности, обусловленный именно пропускной способностью сети.

Информационной базой исследования являются обосновывающие материалы к Схеме и программе развития (СИПР) электроэнергетических систем России на 2026-2031 годы для энергосистемы Кемеровской области – Кузбасса, в которых отчетным принят 2024 год, а также региональные СИПР и статистические данные за 2025 год [1-3].

Целью настоящей работы является аналитическая оценка текущего состояния энергосистемы Кузбасса и обоснование приоритетных направлений повышения надёжности электроснабжения на основе актуализированных данных СИПР и режимных характеристик энергосистемы [4-7].

Новизна работы состоит в систематизации сетевых ограничений и мероприятий развития энергосистемы региона с привязкой к проверке по критерию N-1, под которым понимается расчетная оценка сохранения допустимого режима при отключении одного элемента сети, и последующей укрупненной технико-экономической оценке, позволяющей ранжировать проекты по ожидаемому техническому эффекту и затратам.

Материалы и методы. Для сопоставления технического эффекта мероприятий использованы результаты режимных расчетов и проверок по условию N-1, приведенные в обосновывающих материалах СИПР [1, 2]. Нарушением условия N-1 считается ситуация, при которой после такого отключения возникают превышение аварийно допустимой токовой нагрузки, снижение напряжения ниже аварийно допустимого уровня либо необходимость аварийного ограничения нагрузки.

В качестве контрольных показателей приняты:

1. Превышение аварийно допустимых токовых нагрузок (АДТН) на элементах сети;
2. Снижение напряжений ниже аварийно допустимых значений;
3. Необходимость противоаварийных ограничительных воздействий и (или) аварийного ограничения нагрузки.

Термины и функции противоаварийной автоматики рассматриваются в трактовке ГОСТ 34045-2023 [8].

Оценка эффекта выполнялась путем сопоставления состояния сети до и после реализации мероприятий при одинаковых условиях контингентов N-1 (отключение одного элемента) и одинаковом уровне нагрузки в характерных режимах (прежде всего осенне-зимний максимум). В работе использовались значения минимальных напряжений U_{min} и относительных загрузок элементов сети, представленные в материалах СИПР для соответствующих контингентов [9-10].

Для повышения воспроизводимости вводятся укрупненные индексы тяжести нарушений:

$$J_I = \sum_{k \in K_I} \max(0; I_k / I_k^{lim} - 1), J_U = \sum_{k \in K_U} \max(0; U_k^{lim} - U_k),$$

где I_k и U_k – рассчитанные значения тока и напряжения в контролируемом режиме; I_k^{lim} и U_k^{lim} – соответствующие аварийно допустимые пределы; K_I и K_U – множества контролируемых элементов сети и узлов.

Под вариантами в работе понимаются: исходная схема сети до реализации мероприятия и расчетные схемы после реализации одного или нескольких мероприятий, например установки автомата ограничения перегрузки оборудования (АОПО), ввода батареи статических конденсаторов (БСК), строительства отпаяк воздушных линий (ВЛ), замены автотрансформаторов или строительства новой подстанции. Сравнение вариантов выполняется для одного и того же расчетного условия: одинаковый уровень нагрузки, одинаковый характерный режим и один и тот же контингент N-1. Для каждого варианта определяются значения индексов J_I и J_U . Чем меньше значения этих индексов, тем ниже выраженность токовых перегрузок и нарушений по напряжению. Вариант считается технически более предпочтительным, если он обеспечивает снижение J_I и J_U до нуля либо до минимальных значений при сопоставимых капитальных затратах. При этом индексы используются только как укрупненная мера сопоставления и не заменяют полноценный режимный расчет [9].

Укрупненная оценка капитальных затрат приведена в форме диапазонов и предназначена для сравнительного ранжирования. В качестве базы использованы укрупненные нормативы цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электросетевого хозяйства (УНЦ), утвержденные приказом Минэнерго России от 26.02.2024 № 131, нормативы рассчитаны в ценах на 01.01.2023 и приведены без НДС [11]. Показатели капитальных затрат (CAPEX) в статье рассматриваются как ориентиры, требующие уточнения на предпроектной стадии.

Анализ текущей ситуации в энергосистеме региона. По данным обосновывающих материалов СиПР установленная мощность электростанций энергосистемы Кемеровской области – Кузбасса в 2020-2025 гг. составляет 5,4-5,5 ГВт и имеет тенденцию к снижению (таблица 1). Основу генерации формируют крупные ГРЭС и ТЭЦ, перечень которых приведен в таблице 2.

Таблица 1. Динамика установленной мощности энергосистемы Кузбасса

Год	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Установленная мощность, МВт	5520	5498	5472	5465,8	5466,6	5413,6

Таблица 2. Генерирующий комплекс Кузбасса (по данным СиПР, отчетный 2024 год)

№	Электростанция	Компания	Установленная мощность, МВт
1	Томь-Усинская ГРЭС	АО «Кузбассэнерго»	1345,4
2	Беловская ГРЭС	АО «Кузбассэнерго»	1260
3	Западно-Сибирская ТЭЦ	ООО «ЕВРАЗ ЗСМК»	600
4	Ново-Кемеровская ТЭЦ	АО «Ново-Кемеровская ТЭЦ»	580
5	Южно-Кузбасская ГРЭС	ПАО «ЮК ГРЭС»	554
6	Кемеровская ГРЭС	АО «Кемеровская генерация»	485
7	ГТЭС «Новокузнецкая»	АО «Кузбассэнерго»	297,4
8	Кузнецкая ТЭЦ	АО «Кузнецкая ТЭЦ»	108
9	ТЭЦ Юргинский машиностроительный завод	ООО «Интеграл»	85
10	Кемеровская ТЭЦ	АО «Кемеровская генерация»	80
11	Центральная ТЭЦ	ООО «ЭнергоТранзит»	24
12	КЭС «Кокс»	ПАО «Кокс»	24
13	ГПЭС КАО «Азот»	КАО «Азот»	13,5
14	ТЭЦ Каскад-Энерго	ОАО «Каскад-Энерго»	9,5

Снижение установленной мощности обусловлено следующими основными причинами:

– Вывод физически изношенных энергоблоков. Значительная часть турбоагрегатов была введена в эксплуатацию в 1950–1970-х годах. К настоящему времени эти блоки достигли предельных значений по наработке часов, усталостным характеристикам металла роторов и ресурсу котельного оборудования.

– Ужесточение экологических требований. Введение более строгих нормативов по выбросам оксидов азота, серы и золоулавливанию сделало экономически нецелесообразной эксплуатацию части старых.

– Отсутствие эквивалентного ввода новых мощностей. В регионе за рассматриваемый период не реализованы проекты строительства новых крупных конденсационных энергоблоков, способных компенсировать выбывшие мощности.

В результате установленная мощность сокращается, а располагаемая мощность снижается ещё в большей степени вследствие ограничений по технической готовности оборудования.

Энергосистема Кузбасса является системно энергодефицитной по балансу электрической энергии [1-3]. Производство сосредоточено на Беловской ГРЭС, Томь-Усинской ГРЭС, Южно-Кузбасской ГРЭС, Кемеровской и Новокузнецких ТЭЦ и в 2020-2024 гг. находилось на уровне 20-21 млрд кВт·ч в год, тогда как потребление в 2020-2024 гг. составляло около 31 млрд кВт·ч; в 2025 г. отмечено снижение до 29,6 млрд кВт·ч. Разница покрывается за счёт межсистемных перетоков из Красноярского края, Республики Хакасия, Новосибирской и Томской областей, Алтайского края и Республики Алтай. Это означает устойчивую зависимость региона от внешних источников электроэнергии, особенно в режиме максимума нагрузки. В таблице 3 приведен баланс мощности и энергопотребления региона.

Таблица 3. Баланс мощности и энергопотребления региона

Наименования	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Производство электрической энергии, млн. кВтч	20432,2	18646,6	21334,2	20744,4	20163	18906,7
Потребление электрической энергии, млн. кВтч	31293	31800	31172	31233	30980	29 581,3
Годовой темп прироста, %	-1,45	1,62	-1,97	0,20	-0,81	-4,5
Максимум потребления мощности, МВт	4335	4393	4384	4519	4311	4150
Разница между произведенной и потребленной электроэнергией, млн. кВтч	10860,8	13153,4	9837,8	10488,6	10817	10674,6

Таким образом, зависимость Кузбасса от внешних источников электроэнергии носит устойчивый характер и является важным фактором системной уязвимости, особенно в периоды пиковых нагрузок. Время использования максимума мощности (отношение годового потребления к максимуму) для 2023-2025 гг. составляет порядка 6800-7000 ч, что характерно для промышленных регионов с высокой долей непрерывных производств. Однако рост пиков приводит к:

- увеличению токовых нагрузок трансформаторов и ВЛ в часы максимумов;
- ужесточению режимов по напряжению в удалённых узлах;
- повышению вероятности ввода графиков аварийного ограничения (ГАО) при аварийных и ремонтных схемах.

Отраслевая структура электропотребления Кузбасса отражает промышленную направленность региона (таблица 4) [5-7, 12-14].

Таблица 4. Структура электропотребления по отраслям, %

Отрасль	2020	2021	2022	2023	2024
Угледобыча	40	39	39	38	38
Металлургия	20	20	21	21	21
Химическая промышленность	7	8	8	8	8
Железнодорожный транспорт	6	6	6	6	6
Коммунально-бытовой сектор	17	18	18	18	18
Прочие	10	9	8	9	9

Доля угледобычи и металлургии суммарно превышает 59-60 %, что подтверждает высокоиндустриальный характер энергопотребления. Одновременно фиксируется рост доли коммунально-бытового сектора, усиливающий вечерние пики нагрузок.

Согласно СИПР, даже при реализации части мероприятий по развитию сетей и генерации сохраняется дефицит располагаемой мощности в осенне-зимний максимум: от 84 МВт в 2026 г. до 245 МВт в 2030 г. [1, 2].

В ряде публикаций по Кузбасской энергосистеме [4-7] дополнительным ограничивающим фактором названы «узкие места» в сети 110 кВ, в первую очередь:

- транзит 110 кВ Ново-Анжерская – Ачинск тяговая;
- транзит 110 кВ Краснополянская – Барышевская.

По данным режимных расчетов, приведенных в материалах СИПР, именно по этим транзитам в аварийных и ремонтных схемах возникает снижение напряжения ниже аварийно допустимого уровня и превышение аварийно допустимых токовых нагрузок, что требует либо ввода графиков аварийного ограничения нагрузки, либо реализации комплекса сетевых мероприятий.

В материалах СИПР и региональных программ отмечается высокая степень износа генерирующего и сетевого оборудования: по оценкам, средний физический износ тепловых электростанций превышает 60-65 %, трансформаторов 110-220 кВ – 60 %, воздушных линий 110–220 кВ – 65-70 % (таблица 5) [1-3]. Это приводит к:

- росту частоты отказов;
- снижению фактической располагаемой мощности;
- ограничению допустимых длительных токовых нагрузок;
- увеличению потерь мощности и энергии.

Таким образом, текущая ситуация в энергосистеме Кузбасса определяется сочетанием режимного дефицита мощности, сетевых «узких мест» и устаревания оборудования, что требует приоритизации мероприятий по развитию линий и подстанций.

Таблица 5. Средний уровень износа оборудования

Элемент	Средний износ, %
ТЭС	65
Трансформаторы 110-220 кВ	62
Воздушные линии 110-220 кВ	68
Распределительные устройства 6-10 кВ	71

Это приводит к росту аварийности, снижению допустимых длительных нагрузок и увеличению потерь электроэнергии [15].

Основные режимные проблемы формируются в сетях 110-220 кВ, особенно в южной и восточной частях региона. Радиальные схемы питания, высокая загрузка трансформаторов и недостаток резервных связей обуславливают низкую устойчивость к одиночным авариям. Именно сетевой фактор в настоящее время является главным ограничителем развития энергосистемы, а не отсутствие генерации как таковой [1-2, 16].

Мероприятия по повышению надёжности системы электроснабжения. Повышение надёжности электроснабжения энергосистемы Кузбасса в среднесрочной перспективе обеспечивается, прежде всего, за счёт развития сетевого комплекса 110-

220 кВ и модернизации подстанционного оборудования. Как показал анализ текущего состояния энергосистемы региона, дефицит мощности в Кузбассе носит преимущественно сетевой характер, что обусловлено перегрузкой транзитов, ограниченной пропускной способностью трансформаторных узлов и высоким уровнем износа оборудования. В этой связи основная часть капитальных вложений в рамках СИПР направляется именно на развитие электрических сетей и центров питания, а сами мероприятия сгруппированы по двум ключевым направлениям: усиление линий электропередачи и модернизация подстанций.

Развитие линий электропередачи 110-220 кВ. Мероприятия по линиям электропередачи направлены на устранение «узких мест» в наиболее нагруженных транзитах, которые в аварийных и ремонтных режимах определяют необходимость ввода ограничений нагрузки. Ниже рассмотрены два характерных примера таких транзитов [9, 16-19].

1. Транзит 110 кВ Ново-Анжерская – Ачинск тяговая:

Рассматриваемый транзит относится к числу наиболее нагруженных направлений энергосистемы и обеспечивает электроснабжение тяговых подстанций Восточного полигона ОАО «РЖД», а также значительного объёма промышленной и коммунально-бытовой нагрузки. Его режимные характеристики во многом определяют надёжность электроснабжения восточной части региона.

Технические параметры участка:

1. Номинальное напряжение: 110 кВ;
2. Провод: АС-240 (основная часть);
3. Допустимая длительная токовая нагрузка: 600-650 А;
4. Пропускная способность: 110-120 МВт;
5. Фактическая загрузка в часы максимума: до 95-105 %.

В аварийных и ремонтных режимах на отдельных участках транзита фиксируется превышение аварийно допустимых токовых нагрузок (АДТН), а также снижение уровней напряжения ниже аварийно допустимых значений, что приводит к рискам ввода графиков аварийного ограничения нагрузки. Таким образом, без структурной разгрузки данного направления дальнейший рост нагрузки в зоне ответственности невозможен без снижения уровня надёжности.

Предлагаемые мероприятия:

1. Установка автоматики ограничения перегрузки оборудования, далее АОПО, на ПС 110 кВ Иверка с действием на отключение нагрузки объемом до 43 МВт;
2. Установка батарей статических конденсаторов, далее БСК: ПС Мариинск - 2×30 МВар и ПС Каштан тяговая – 2×30 МВар.
3. По данным режимных расчетов, приведенных в материалах СИПР, суммарная компенсация реактивной мощности 120 МВар может обеспечить повышение уровней напряжения в узлах сети на 4-6 % и снижение активных потерь электроэнергии на 3-4 % [1-2].
4. Строительство отпаяк от ВЛ 110 кВ: Ново-Анжерская – Иверка до ПС Почитанка и Яйская – Иверка до ПС Почитанка.

Реализация указанных мероприятий формирует дополнительный путь питания и существенно снижает чувствительность транзита к одиночным повреждениям, переводя его из разряда «ограничивающих» в устойчиво функционирующие.

Укрупненные экономические параметры предлагаемых мероприятий (для сравнительного ранжирования, по УНЦ Минэнерго и данным СИПР) [11]:

1. БСК 110 кВ: 35-45 млн руб./10 Мвар, суммарно около 420-540 млн руб.

2. Устройства АОПО: 25-35 млн руб. за объект.
3. Строительство отпаяк ВЛ 110 кВ: 1 825 млн руб./км.

Ожидаемый эффект комплекса мероприятий состоит в снижении объема ГАО, стабилизации уровней напряжения и уменьшении перегрузки контролируемых участков. Расчетная проверка данного мероприятия по критерию N-1 приведена ниже в разделе анализа выделенных мероприятий.

2. Транзит 110 кВ Краснополянская – Барышевская:

Если для транзита Ново-Анжерская – Ачинск тяговая ключевым является сочетание высокой загрузки и дефицита реактивной мощности, то для участка Краснополянская – Барышевская основной проблемой является характер перераспределения потоков мощности в аварийных режимах. Данный транзит функционирует в составе кольцевого участка сети, питающего часть промышленных и тяговых нагрузок.

Технические параметры участка:

1. Напряжение: 110 кВ;
2. Провод: АС-185;
3. Допустимая пропускная способность: 85-95 МВт;
4. Фактическая загрузка в пике: до 90-95 %.

В аварийных режимах имеет место каскадное перераспределение потоков мощности с перегрузкой смежных линий и риском развития нарушения по каскадному сценарию.

Предлагаемое мероприятие: установка АОПО на ПС 110 кВ Барышевская по ВЛ: Барышевская – Горная, Барышевская – Буготак.

Укрупненные экономические параметры: стоимость комплекса АОПО составляет 30-40 млн руб [20].

Экономический и системный эффекты:

1. Предотвращение каскадных отключений;
2. Снижение вероятности каскадного развития и сокращение времени локализации аварийного режима за счет автоматического ограничительного воздействия (по оценке СИПР) [1-2].

Мероприятие по транзиту Краснополянская – Барышевская рассматривается как противоаварийное и направлено прежде всего на локализацию аварийного режима и предотвращение каскадного развития нарушения.

Развитие подстанционного комплекса 110-500 кВ. Мероприятия по линиям электропередачи были бы недостаточны без соответствующего усиления подстанционных узлов, через которые проходят основные потоки мощности. Поэтому вторым блоком СИПР для энергосистемы Кузбасса является реконструкция и новое строительство подстанций 110-500 кВ, обеспечивающих как межсистемные перетоки, так и питание крупных промышленных и транспортных центров [9, 16-19].

1. ПС 500 кВ Ново-Анжерская:

Подстанция 500 кВ Ново-Анжерская является одним из ключевых межсистемных и внутрисистемных узлов энергосистемы Кузбасса и непосредственно связана с рассмотренным выше транзитом 110 кВ.

Технические параметры:

1. Класс напряжения: 500/220/110/10 кВ;
2. Мощность автотрансформаторов до реконструкции: 3×250 МВА;
3. После установки дополнительного АТ: 4×250 МВА = 1000 МВА.

Системный эффект мероприятия связан с увеличением трансформаторной мощности узла и повышением допустимости ремонтных и аварийных схем. Подробная оценка эффекта приведена в разделе анализа выделенных мероприятий. Затраты на мероприятие составят 1,5-2,0 млрд руб. [20].

2. Подстанции 220 кВ (НКАЗ-2, ЗСМК, Междуреченская):

Для крупных промышленных центров региона (металлургия, угольная отрасль) важнейшую роль играют подстанции 220 кВ, через которые осуществляется передача мощности на уровень 110 кВ.

Технические параметры:

1. Замена АТ 200 МВА на 250 МВА;
2. Рост трансформаторной мощности узлов на 20-25 %;
3. Снижение загрузки АТ в ОЗП с 95–100 % до 70-80 %.

Затраты на мероприятия – АТ 220/110 кВ 250 МВА: 900-1200 млн руб. [11]

Такая модернизация создаёт необходимый резерв по мощности для подключения перспективной нагрузки без ухудшения режимов.

3. Подстанции 110 кВ (Литвиново, Ново-Чертинская, Кийзасская):

На уровне 110 кВ решаются задачи перераспределения мощности и питания распределительных сетей 35–6(10) кВ. В таблице 6 приведены параметры модернизации.

Таблица 6. Параметры модернизации

ПС	Было	Стало	Рост
Литвиново	2×10 МВА	2×25 МВА	150%
Ново-Чертинская	31,5 МВА	40 МВА	27%
Кийзасская	–	16 МВА	Новое строительство

Затраты: трансформатор 110/10 кВ 25-40 МВА – 180-320 млн руб.; ПС 110 кВ под ключ – 0,9-1,4 млрд руб. [11].

За счёт увеличения трансформаторной мощности и ввода новых центров питания удаётся снизить перегрузки в существующих узлах и уменьшить протяжённость сетей 35 кВ, что непосредственно отражается на потерях и надёжности электроснабжения.

Южный энергорайон и спортивно-туристический комплекс «Шерегеш»:

Отдельного рассмотрения требует южный энергорайон, где в последние годы наблюдается опережающий рост нагрузок, связанный с развитием спортивно-туристического комплекса (СТК) «Шерегеш» и сопутствующей инфраструктуры. В отличие от рассмотренных выше промышленных узлов, здесь доминируют коммунально-бытовые и рекреационные потребители, предъявляющие повышенные требования к качеству и надёжности электроснабжения. Нагрузка южного энергорайона формируется за счёт:

1. Туристической инфраструктуры;
2. Коммунально-бытового сектора;
3. Предприятий переработки.

Перспективная нагрузка СТК «Шерегеш» к 2030 г. оценивается в 45-60 МВт (по суммарным техническим условиям и стратегии развития территории).

Предлагаемые технические решения:

1. Строительство ПС 110/35/10 кВ 2×25 МВА;
2. Строительство двух ВЛ 110 кВ (схема N-1);

3. Установка БСК 10-15 МВар.

Затраты:

1. ПС 110 кВ: 1,2-1,6 млрд руб. [20]

2. ВЛ 110 кВ (15-20 км): 300-500 млн руб. [11]

Системный эффект мероприятия связан с ликвидацией локального дефицита мощности и повышением надежности электроснабжения потребителей туристического кластера. Расчетно-аналитическая оценка данного эффекта приведена ниже.

Таким образом, мероприятия по южному энергорайону логически дополняют сетевые проекты в промышленных и транспортных зонах, обеспечивая комплексное повышение надежности электроснабжения как промышленного, так и рекреационного сегментов экономики региона.

Анализ выделенных мероприятий по условиям надежности и режимным ограничениям. Для оценки технической эффективности мероприятий, представленных ранее, выполнен укрупнённый анализ режимов работы характерных узлов энергосистемы Кузбасса с учётом [9, 16-19]:

1. Критериев статической устойчивости;

2. Допустимых отклонений напряжения;

3. Аварийно допустимых токовых нагрузок (АДТН);

4. Условия надёжности N-1 для линий электропередачи и трансформаторных узлов.

Анализ носит расчетно-аналитический характер и основан на сопоставлении результатов режимных расчетов, приведенных в материалах СИПР, для исходных и целевых схем электроснабжения наиболее нагруженных энергорайонов. Используемые численные значения (загрузки, U_{min} , объемы ограничений) приводятся по данным СИПР и рассматриваются как воспроизводимая исходная база.

Анализ транзита 110 кВ Ново-Анжерская – Ачинск по условию N-1:

Для пояснения порядка сравнения вариантов рассмотрен транзит 110 кВ Ново-Анжерская – Ачинск тяговая. В качестве исходного принимается режим после отключения одного элемента сети, то есть расчетный контингент N-1. По данным режимных расчетов СИПР для исходной схемы фиксируется превышение аварийно допустимой токовой нагрузки на контролируемом участке до 115 % и снижение напряжения в удаленном узле до $0,87 U_{ном}$ при аварийно допустимом уровне $0,90 U_{ном}$.

Для исходной схемы токовый индекс тяжести нарушения составляет:

$$J_I = \max(0; 1,15 - 1) = 0,15.$$

Индекс нарушения по напряжению составляет:

$$J_U = \max(0; 1,9 - 0,87) = 0,03.$$

После реализации комплекса мероприятий, включающего установку АОПО, ввод БСК суммарной мощностью 120 МВар и строительство отпаяк на ПС Почитанка, нагрузка контролируемого участка снижается до 0,98 от аварийно допустимой, а минимальное напряжение повышается до $0,93 U_{ном}$. Для целевой схемы получаем:

$$J_I = \max(0; 0,98 - 1) = 0,$$

$$J_U = \max(0; 0,9 - 0,93) = 0.$$

Следовательно, для выбранного расчетного контингента N-1 рассматриваемый комплекс мероприятий устраняет как токовую перегрузку, так и нарушение по напряжению. Пример показывает принцип сопоставления исходной и целевой схем по укрупненным индексам тяжести нарушений. При этом такой расчет не заменяет полной режимной проверки, а используется для наглядного обоснования технического эффекта мероприятия.

Транзит 110 кВ Ново-Анжерская – Ачинск тяговая является одним из наиболее нагруженных элементов сети восточной части региона. В исходном состоянии при отключении одного из ключевых участков происходит перераспределение потоков мощности на смежные ВЛ с выходом за пределы АДТН и снижением напряжения в узлах Иверка – Мариинск – Каштан тяговая. Как показано в расчетном примере, комплекс мероприятий, включающий АОПО, БСК и отпайки на ПС Почитанка, переводит рассматриваемый транзит из режима нарушения условия N-1 в допустимый режим.

Таким образом, реализация комплекса мероприятий переводит транзит 110 кВ Ново-Анжерская – Ачинск тяговая из режима структурного нарушения условия N-1 в допустимый режим, что принципиально повышает устойчивость электроснабжения тяговых и промышленных потребителей.

Анализ транзита 110 кВ Краснополянская – Барышевская на устойчивость к каскадным нарушениям:

Для участка Краснополянская – Барышевская характерны не столько предельные перегрузки в нормальном режиме, сколько неблагоприятный характер перераспределения потоков при авариях. При отключении одной из линий кольцевой схемы возникает каскадный рост токов в соседних ВЛ с угрозой последовательного отключения нескольких элементов сети.

Установка АОПО на ПС 110 кВ Барышевская обеспечивает:

1. Автоматическую локализацию аварийного режима в пределах одного энергорайона;
2. Предотвращение перехода нарушения в каскадную стадию;
3. Сокращение времени локализации нарушения и восстановления питания за счет автоматического ограничительного воздействия (типично с 30-40 до 10-15 минут по оценке СиПР) [1, 2].

Таким образом, мероприятие по своей функциональной сути решает не задачу увеличения пропускной способности, а задачу повышения противоаварийной устойчивости, что особенно важно для промышленных потребителей II категории.

Анализ влияния реконструкции ПС 500 кВ Ново-Анжерская на межсистемные перетоки:

Установка дополнительного автотрансформатора 500/220 кВ 250 МВА на ПС Ново-Анжерская приводит к увеличению суммарной трансформаторной мощности узла до 1000 МВА. Это позволяет:

1. Перераспределить часть потоков мощности с перегруженных узлов 220 кВ;
2. Снизить коэффициенты загрузки существующих АТ до 0,7-0,75 в осенне-зимний максимум;
3. Повысить допустимые перетоки по связям 500-220 кВ.

С точки зрения надёжности, данное мероприятие:

- устраняет необходимость ограничения перетоков в ремонтных схемах;
- повышает устойчивость при отключении одного из автотрансформаторов (условие N-1 для узла 500 кВ).

Анализ мероприятий на подстанциях 110 и 220 кВ с позиции локального дефицита мощности:

Замена автотрансформаторов 200 МВА на 250 МВА на ПС 220 кВ НКАЗ-2, ЗСМК и Междуреченская снижает загрузку трансформаторов в максимум нагрузки с 95-100 до 70-80 % [11], что:

1. Увеличивает ресурс изоляции;
2. Снижает вероятность перегрева обмоток.

Для уровня 110 кВ (ПС Литвиново, Ново-Чертинская, Кийзасская) увеличение трансформаторной мощности приводит к:

1. Снижению перегрузок в распределительных сетях 35-110 кВ;
2. Перераспределению токовых нагрузок;
3. Уменьшению суммарных потерь напряжения в питающих линиях.

В результате локальные энергоузлы переходят из состояния дефицита трансформаторной мощности в состояние нормативного резерва.

Анализ южного энергорайона и узла СТК «Шерегеш»:

Для существующей схемы электроснабжения Шерегешского энергоузла через сети 35-10 кВ характерны:

1. Высокие потери напряжения в удалённых точках;
2. Отсутствие резервирования по схеме N-1;
3. Перегрузки трансформаторов в пиковые часы зимнего периода.

По укрупненной оценке, выполненной на основе материалов СиПР и заявленной перспективной нагрузки, при достижении 45-60 МВт без строительства ПС 110 кВ формируется локальный дефицит мощности до 15-20 МВт в максимуме нагрузки [1-2, 14, 21].

После реализации схемы ПС 110/35/10 кВ 2×25 МВА, две ВЛ 110 кВ, БСК 10–15 МВар обеспечивается:

1. Выполнение условия N-1 по стороне 110 и 35 кВ;
2. Стабилизация напряжений в узлах 10 кВ на уровне 0,95-1,05 $U_{ном}$;
3. снижение потерь активной мощности на 25-30 %.

Обобщенная оценка системного эффекта мероприятий. Реализуемые мероприятия имеют не точечный, а системный эффект, направленный на повышение устойчивости всей энергосистемы Кузбасса в осенне-зимний максимум нагрузки.

Обобщенная оценка результатов представлена в таблице 7, где приведено сопоставление состояния ключевых энергоузлов до и после реализации мероприятий по данным режимных расчетов СиПР с точки зрения выполнения условия N-1 и достигнутого технического эффекта.

Таблица 7. Обобщенная оценка результатов

№	Энергоузел / объект	Мероприятие	Проверка по условию N-1 (до)	Проверка по условию N-1 (после)	Основной технический эффект
1	Транзит 110 кВ Ново-Анжерская – Ачинск тяговая	АОПО на ПС Иверка (43 МВт), БСК 120 МВар, отпайки на ПС Почитанка	Превышение АДТН до 110–115 %, $U_{min} = 0,87-0,89 U_{ном}$, необходимость отключения 30–45 МВт нагрузки	Перегрузки не превышают 95-98 %, $U_{min} = 0,93-0,95 U_{ном}$, отключение нагрузки не требуется	Выполнение условия N-1, стабилизация напряжений, снижение ГАО

2	Транзит 110 кВ Краснополянская – Барышевская	АОПО на ПС Барышевская	Каскадное перераспределение потоков, риск последовательного отключения ВЛ	Локализация аварии в пределах узла, отсутствие каскадного развития	Повышение противоаварийной устойчивости
3	ПС 500 кВ Ново- Анжерская	Установка АТ 500/220 кВ 250 МВА	Загрузка АТ до 95- 100 %, ограничение перетоков в ремонтных схемах	Загрузка АТ 70-75 %, перетоки не ограничиваются	Выполнение N-1 для узла 500 кВ, рост пропускной способности
4	ПС 220 кВ НКАЗ-2, ЗСМК, Междуреченская	Замена АТ 200 на 250 МВА	Работа в предельных режимах, дефицит трансформаторной мощности	Формирование нормативного резерва мощности	Повышение надёжности электроснабжения промпотребителей
5	ПС 110 кВ Литвиново	Замена 2×10 на 2×25 МВА	Перегрузка трансформаторов в ОЗП, ограничение ТП	Загрузка трансформаторов в пределах 70-75 %	Снятие локального дефицита мощности
6	ПС 110 кВ Ново- Чертинская	Замена 31,5 на 40 МВА	Нарушение условия N-1 при аварии трансформатора	Выполнение условия N-1	Повышение надёжности распределительных сетей
7	ПС 110 кВ Кийзасская	Новое строительство 16 МВА	Длинные сети 35 кВ, высокие потери, отсутствие резервирования	Короткие плечи питания, резервирование по 110 кВ	Снижение потерь, рост надёжности
8	Южный энергорайон, СТК «Шерегеш»	ПС 110/35/10 кВ 2×25 МВА, 2 ВЛ 110 кВ, БСК 10–15 МВар	Нарушение N-1, локальный дефицит до 15–20 МВт, $U < 0,9 U_{ном}$	Полное выполнение N-1, $U = 0,95-1,05 U_{ном}$	Ликвидация дефицита мощности, снижение потерь на 25–30 %

Выводы. Показано, что энергосистема Кемеровской области – Кузбасса характеризуется устойчивым энергодефицитом по балансу электрической энергии при высоком уровне физического износа генерирующего и сетевого оборудования; при этом в отдельных узлах и транзитах формируются риски локального дефицита мощности из-за сетевых ограничений.

Отмечено, что перегрузки линий электропередачи и трансформаторных узлов в сетях 110-220 кВ увеличиваются в осенне-зимний максимум и в ремонтных схемах, при этом динамика максимума нагрузки в 2020-2025 гг. носит неоднородный характер (таблица 3).

Сделан вывод, что основные ограничения надежности электроснабжения имеют преимущественно сетевой характер и связаны с пропускной способностью и уровнем напряжения в сетях 110-220 кВ.

На основе материалов СИПР обоснован комплекс приоритетных мероприятий по развитию транзитов 110 кВ, реконструкции подстанций 500, 220 и 110 кВ, а также созданию нового центра питания южного энергорайона.

Сопоставление результатов режимных расчетов СИПР до и после реализации мероприятий по критерию N-1 показывает их системный эффект, выражающийся в снижении перегрузок, стабилизации напряжений и уменьшении потребности в аварийном ограничении нагрузки. На примере транзита 110 кВ Ново-Анжерская - Ачинск тяговая показано, что использование укрупненных индексов тяжести нарушений позволяет наглядно сравнить исходную и целевую схемы по снижению токовых перегрузок и отклонений напряжения при одном и том же расчетном контингенте N-1.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Схемы и программы развития электроэнергетических систем России. СиПР ЭЭС России на 2026–2031 годы. – URL: <https://www.so-ups.ru/future-planning/sipr-ees/> (дата обращения 19.02.2026).
2. Обосновывающие материалы. Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2026–2031 годы. Энергосистема Кемеровской области. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/public_discussion/2025/final/support_mat/19_Kemerovskaja_oblast-Kuzbass.pdf (дата обращения 19.02.2026).
3. Отчет о функционировании энергосистем России в 2025 году. – Москва : АО «СО ЕЭС», 2026. – 5 с. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2026/ups_rep2025.pdf (дата обращения 11.03.2026).
4. Анализ состояния Кузбасской энергосистемы / И. Н. Паскарь, Г. М. Лебедев, С. А. Захаров, А. В. Иволга // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 5(117). – С. 74–79.
5. Паскарь, И. Н. Техноценологический подход к анализу электропотребления Кемеровской области / И. Н. Паскарь, Г. М. Лебедев, С. А. Захаров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 1(119). – С. 75–82.
6. Паскарь, И. Н. Применение техноценологического подхода для планирования развития генерирующих мощностей региональной энергосистемы / И. Н. Паскарь, Ф. С. Непша // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 10. – С. 155–160. – DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-155-160.
7. Завьялов, Н. В. Исследование региональных энергетических систем с применением техноценологического подхода / Н. В. Завьялов, И. Н. Паскарь, Г. М. Лебедев // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 2(172). – С. 39–50. – DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-39-50. – EDN LMPVXG.
8. ГОСТ 34045–2023. Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем: межгосударственный стандарт: введен 2023-06-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 23 с.
9. Хрущев, Ю. В. Электроэнергетические системы и сети. Электромеханические переходные процессы: учеб. Пособие / Ю. В. Хрущев, К. И. Заповодников, А. Ю. Юшков. – Москва: Юрайт, 2017. – 153 с.
10. Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем: приказ Минэнерго России от 12.07.2018 № 548. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201808210042> (дата обращения 19.02.2026).
11. Об утверждении укрупненных нормативов цены технологических решений: приказ Минэнерго России от 26.02.2024 № 131. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202403010042> (дата обращения 11.03.2026).
12. Российский статистический ежегодник 2025. – Москва: Росстат, 2025. – 621 с. – URL: https://www.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ejegodnik_2025.pdf (дата обращения 19.02.2026).
13. Регионы России. Социально-экономические показатели 2024. – Москва: Росстат, 2024. – 1081 с. – URL: https://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2024.pdf (дата обращения 19.02.2026).
14. Закон Кемеровской области – Кузбасса от 26.12.2018 № 122-ОЗ «О стратегии социально-экономического развития до 2035 года». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/550305101> (дата обращения 11.03.2026).

15. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: приказ Минэнерго России от 04.10.2022 № 1070. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202212060056> (дата обращения 19.02.2026).
16. Фролов, Ю. М. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. Пособие / Ю. М. Фролов. – Москва: Юрайт, 2024. – 351 с.
17. Лыкин, А. В. Электроэнергетические системы и сети: учебник / А. В. Лыкин. – Москва: Юрайт, 2025. – 360 с.
18. Варганова, А. В. Надежность систем электроснабжения: учебник. / А. В. Варганова, А. Н. Шеметов, Д. О. Позин. – Москва: Юрайт, 2026. – 142 с.
19. Сивков, А. А. Основы электроснабжения: учеб. пособие / А. А. Сивков, А. С. Сайгаш, Д. Ю. Герасимов. – Москва: Юрайт, 2020. – 173 с.
20. Приказ Минэнерго России от 08.02.2019 № 81 «О перегрузочной способности трансформаторов». – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001201903290030> (дата обращения 26.02.2026).
21. Стратегия развития спортивно-туристического комплекса «Шерегеш» до 2035 года. – URL: <https://ako.ru/upload/iblock/833/hthf87rq2bobcvxmtdzk0xgn4df1h7ds/48616.pdf> (дата обращения 26.02.2026).

REFERENCES LIST

1. Skhemy i programmy razvitiia elektroenergeticheskikh sistem Rossii. SiPR EES Rossii na 2026–2031 gody. – URL: <https://www.so-ups.ru/future-planning/sipr-ees/> (data obrashcheniia 19.02.2026).
2. Obosnovyvauiushchie materialy. Skhema i programma razvitiia elektroenergeticheskikh sistem Rossii na 2026–2031 gody. Energosistema Kemerovskoi oblasti. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/public_discussion/2025/final/support_mat/19_Kemerovskaja_oblast-Kuzbass.pdf (data obrashcheniia 19.02.2026).
3. Otchet o funktsionirovanii energosistem Rossii v 2025 godu. – Moskva : AO «SO EES», 2026. – 5 s. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2026/ups_rep2025.pdf (data obrashcheniia 11.03.2026).
4. Analiz sostoiianiia Kuzbasskoi energosistemy / I. N. Paskar, G. M. Lebedev, S. A. Zakharov, A. V. Ivolga // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2016. – № 5(117). – S. 74–79.
5. Paskar, I. N. Tekhnotsenologicheskii podkhod k analizu elektropotrebleniia Kemerovskoi oblasti / I. N. Paskar, G. M. Lebedev, S. A. Zakharov // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – № 1(119). – S. 75–82.
6. Paskar, I. N. Primenenie tekhnotsenologicheskogo podkhoda dlia planirovaniia razvitiia generiruiushchikh moshchnostei regionalnoi energosistemy / I. N. Paskar, F. S. Nepsha // Izvestiia Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 10. – S. 155–160. – DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-155-160.
7. Zavialov, N. V. Issledovanie regionalnykh energeticheskikh sistem s primeneniem tekhnotsenologicheskogo podkhoda / N. V. Zavialov, I. N. Paskar, G. M. Lebedev // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – 2024. – № 2(172). – S. 39–50. – DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-39-50. – EDN LMPBXG.
8. GOST 34045–2023. Elektroenergeticheskie sistemy. Operativno-dispatcherskoe upravlenie. Avtomaticheskoe protivovariinoe upravlenie rezhimami energosistem. Protivovariinaia avtomatika energosistem: mezhgosudarstvennyi standart: vveden 2023-06-01. – M.: Rossiiskii institut standartizatsii, 2023. – 23 s.
9. Khrushchev, Iu. V. Elektroenergeticheskie sistemy i seti. Elektromekhanicheskie perekhodnye protsessy: ucheb. Posobie / Iu. V. Khrushchev, K. I. Zapodovnikov, A. Iu. Iushkov. – Moskva: Iurait, 2017. – 153 s.
10. Ob utverzhdenii trebovaniia k obespecheniiu nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem: prikaz Minenergo Rossii ot 12.07.2018 № 548. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201808210042> (data obrashcheniia 19.02.2026).
11. Ob utverzhdenii ukрупnennykh normativov tseny tekhnologicheskikh reshenii: prikaz Minenergo Rossii ot 26.02.2024 № 131. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202403010042> (data obrashcheniia 11.03.2026).
12. Rossiiskii statisticheskii ezhegodnik 2025. – Moskva: Rosstat, 2025. – 621 s. – URL: https://www.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ejegovodnik_2025.pdf (data obrashcheniia 19.02.2026).
13. Regiony Rossii. Sotsialno-ekonomicheskie pokazateli 2024. – Moskva: Rosstat, 2024. – 1081 s. – URL: https://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2024.pdf (data obrashcheniia 19.02.2026).
14. Zakon Kemerovskoi oblasti – Kuzbassa ot 26.12.2018 № 122-OZ «O strategii sotsialno-ekonomicheskogo razvitiia do 2035 goda». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/550305101> (data obrashcheniia 11.03.2026).

15. Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektricheskikh stantsii i setei Rossiiskoi Federatsii: prikaz Minenergo Rossii ot 04.10.2022 № 1070. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202212060056> (data obrashcheniia 19.02.2026).
16. Frolov, Iu. M. Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriatii: ucheb. Posobie / Iu. M. Frolov. – Moskva: Iurait, 2024. – 351 s.
17. Lykin, A. V. Elektroenergeticheskie sistemy i seti: uchebnik / A. V. Lykin. – Moskva: Iurait, 2025. – 360 s.
18. Varganova, A. V. Nadezhnost sistem elektrosnabzheniia: uchebnik. / A. V. Varganova, A. N. Shemetov, D. O. Pozin. – Moskva: Iurait, 2026. – 142 s.
19. Sivkov, A. A. Osnovy elektrosnabzheniia: ucheb. posobie / A. A. Sivkov, A. S. Saigash, D. Iu. Gerasimov. – Moskva: Iurait, 2020. – 173 s.
20. Prikaz Minenergo Rossii ot 08.02.2019 № 81 «O peregruzochnoi sposobnosti transformatorov». – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/0001201903290030> (data obrashcheniia 26.02.2026).
21. Strategiia razvitiia sportivno-turisticheskogo kompleksa «Sheregesh» do 2035 goda. – URL: <https://ako.ru/upload/iblock/833/hthf87rq2bobcvxmtzdk0xgn4df1h7ds/48616.pdf> (data obrashcheniia 26.02.2026).

Поступила в редакцию 19.03.2026 г., рекомендована к изданию 10.04.2026 г.

GRID CONSTRAINTS AND WAYS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF THE KUZBASS POWER SYSTEM

Paskar I.N., Kudriashov D.S.

The paper analyzes the power system of the Kemerovo Region - Kuzbass based on the substantiating materials to the Russian electric power systems development plan for 2026-2031 and updated statistics for 2025. The study identifies key grid constraints affecting reliability in 110-220 kV networks, including N-1 violations caused by overloads, low-voltage conditions and limited transformation capacity. Priority measures are substantiated for transmission corridors and substations, including 500, 220 and 110 kV facilities, as well as the creation of a new supply center in the southern district. The results show that the proposed measures reduce overloads, stabilize voltage levels and lower the need for emergency load shedding.

Keywords: power system, 110-220 kV electric grids, power supply reliability, N-1 criterion, substations, transmission lines, power deficit, operating conditions, Kuzbass power system.

Паскарь Иван Николаевич

старший преподаватель кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
Российская Федерация, Кемеровская область,
г. Кемерово.
E-mail: paskar-ivan@mail.ru

Paskar Ivan Nikolaevich

Senior Lecturer at Department of Power Supply for Mining and Industrial Enterprises of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev,
Russian Federation, Kemerovo Region, Kemerovo.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4826-4967>

Кудряшов Дмитрий Семенович

кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения горных и промышленных предприятий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
Российская Федерация, Кемеровская область,
г. Кемерово
E-mail: kudryashovds@kuzstu.ru

Kudriashov Dmitrii Semenovich

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply for Mining and Industrial Enterprises of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev,
Russian Federation, Kemerovo Region, Kemerovo.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2164-5866>

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПОГРУЖНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА С КОЛЬЦЕВЫМИ ТРУБКАМИ

© 2026 Кожухов Н.Н., Надеев А.А., Прутских Д.А., Дубанин В.Ю., Наумов А.М.

В работе представлены результаты численного моделирования процесса обтекания потоком воздуха погружного теплообменного элемента с кольцевыми трубками, предназначенного для аппаратов с псевдооживленным слоем. Составлена и проверена на адекватность расчётная модель обтекания при вертикальной и тангенциальной подаче потока воздуха. В результате вычислительного эксперимента определена величина потерь давления и выполнен анализ полей скоростей воздуха и определены их экстремумы.

Ключевые слова: теплообменный элемент, кольцевые трубки, гидравлическая характеристика, поток воздуха.

Введение. Известно, что одним из способов повышения интенсивности процессов тепло- и массообмена в технологических процессах с дисперсной фазой является применение различных поверхностей нагрева, погружаемых непосредственно в эту фазу [1]. Конструкции погружаемых поверхностей нагрева многообразны, но чаще всего они представляют собой набор трубок, объединённых в пучки [2]. В одной из работ авторами предложена новая конструкция такой поверхности нагрева (теплообменного элемента), предназначенная для цилиндрических аппаратов с направленно перемещающимся псевдооживленным слоем [3]. Его схема представлена на рис. 1.

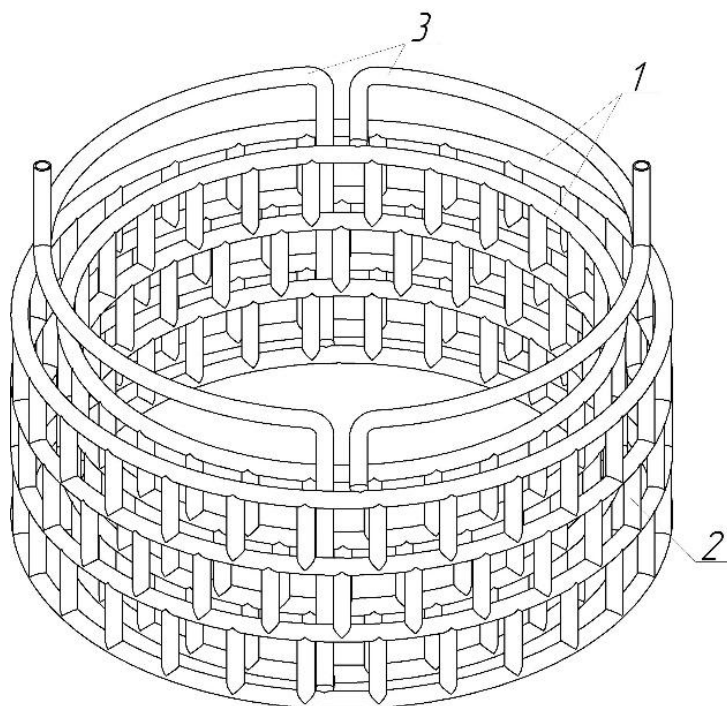


Рис. 1. Схема теплообменного элемента:
1 – основные трубки; 2 – переточная трубка; 3 – трубка-коллектор

Теплообменный элемент состоит из восьми основных трубок 1, имеющих кольцевую форму, и разделённых на две группы. Первая группа содержит четыре трубки (внешние) со средним кольцевым диаметром 355 мм. Вторая группа также содержит четыре трубки (внутренние) со средним кольцевым диаметром трубки 305 мм. Расстояние между группами трубок составляет 22 мм, а между горизонтальными рядами трубок - 35 мм. Кольцевые трубки каждой группы соединены между собой 84 вертикальными участками - переточными трубками 2. Для подачи и отвода теплоносителя применяются две трубки-коллектора 3. Наружный диаметр всех трубок составляет 9,6 мм, материал трубок – медь.

Постановка задачи и численное моделирование течения воздуха. Для оценки работоспособности данного теплообменного элемента необходимо получить его гидродинамические, аэродинамические и тепловые характеристики. Численному исследованию течения и значений скоростей воды в элементе посвящена работа [4].

Известно, что подача охлаждающего агента в аппараты с псевдоожиженным слоем может быть вертикальной и тангенциальной [5]. В данной работе рассмотрены оба варианта. Они представлены на рис. 2.

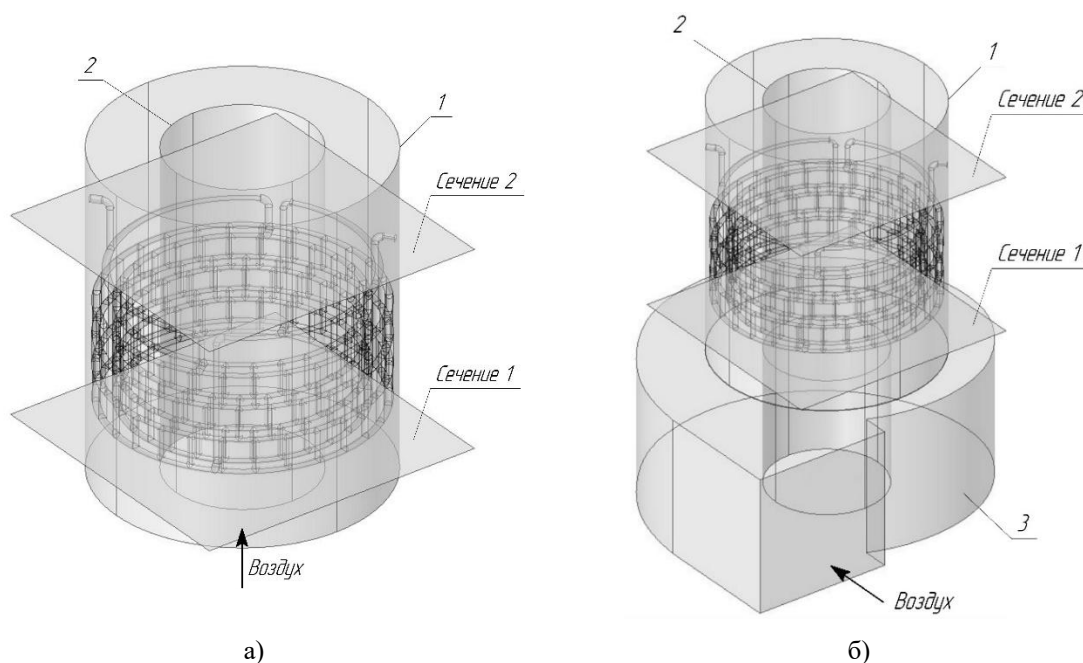


Рис. 2. Схема цилиндрического аппарата с погружным теплообменным элементом с различными способами подачи воздуха:

- а) вертикальная подача воздуха; б) тангенциальная подача воздуха;
1 – внешний цилиндр; 2 – внутренний цилиндр; 3 – тангенциальный патрубок

Теплообменный элемент помещён в канал, образуемый внешним цилиндром диаметром 380 мм и внутренним цилиндром диаметром 200 мм, ширина канала составляет 90 мм. Ширина теплообменного элемента составляет 36 мм. Он расположен ближе к внешнему цилиндру, занимая половину площади поперечного сечения канала (рис. 3).

При вертикальной подаче поток воздуха подаётся в нижнюю часть конструкции аппарата (рис. 2а), проходит через кольцевой канал и выходит из аппарата. При тангенциальной подаче (рис. 2б) воздух сначала поступает в тангенциальный патрубок 3, в котором происходит «закручивание» потока, а затем, пройдя через кольцевой канал с погружным теплообменным элементом, выходит из аппарата.

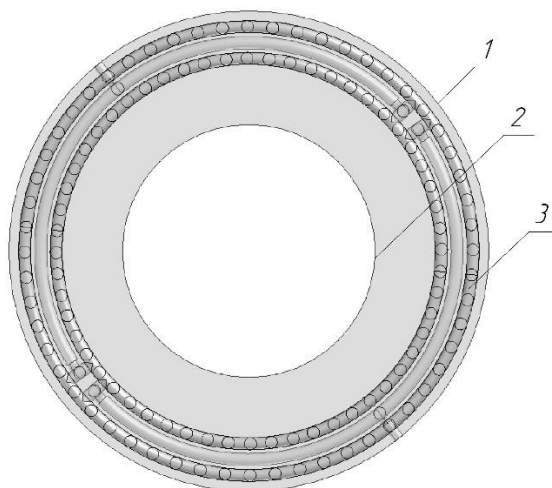


Рис. 3. Схема расположения теплообменного элемента в канале:
1 – внешний цилиндр; 2 – внутренний цилиндр; 3 – теплообменный элемент

Для качественной оценки поля скоростей воздуха в области теплообменного элемента, а также определения абсолютных значений скорости в различных сечениях элемента и величины его гидравлического сопротивления (потерь давления) со стороны воздуха произведён вычислительный эксперимент с использованием методов вычислительной гидродинамики с применением $k-\epsilon$ модели турбулентности [6].

Расход воздуха в обоих случаях принимался одинаковым и составлял 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 кг/с. Температура воздуха принималась равной 20 °С.

В результате обработки результатов вычислительного эксперимента был определён характер обтекания теплообменного элемента потоком воздуха и вычислены потери давления воздуха при разных значениях его расхода.

На рис. 4 приведены зависимости потерь давления воздуха ΔP , Па при его прохождении через кольцевой канал аппарата с теплообменным элементом от его расхода G , кг/с для двух рассматриваемых конструкций. Значения давлений определялись как средние по сечениям на 50 мм ниже теплообменного элемента (рис. 2, сечение 1) и 50 мм выше его трубки-коллектора (рис. 2, сечение 2).

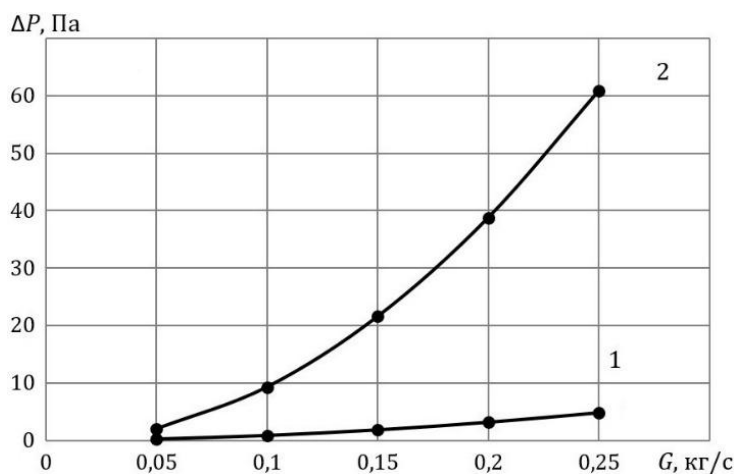


Рис. 4. Зависимость потерь давления от расхода:
1 – вертикальная подача; 2 – тангенциальная подача

Из рис. 4 видно, что для варианта с тангенциальной подачей воздуха перепад давления устройства значительно возрастает с увеличением расхода воздуха по сравнению с вариантом с вертикальной подачей. Это связано с тем, что при вертикальной подаче основной поток воздуха проходит ближе к внутреннему цилиндру. Закручивание потока воздуха при тангенциальной подаче приводит к тому, что большая его часть встречает сопротивление в виде теплообменного элемента.

На рис. 5-6 приведено распределение скорости потока воздуха при вертикальной подаче, полученное для тех же поперечных сечений, при расходе 0,05 кг/с и 0,25 кг/с. Аналогичное распределение для потока при тангенциальной подаче приведено на рис. 7-8. Анализируя поля скорости, можно оценить равномерность потока воздуха в кольцевом канале аппарата.

Так, на рис. 5а и рис. 6а видно, что поток воздуха распределяется по входному сечению 1 неравномерно, наиболее высокие значения скоростей располагаются ближе к его центру. Увеличение расхода воздуха приводит к более равномерному распределению скоростей потока и это происходит непосредственно перед теплообменным элементом.

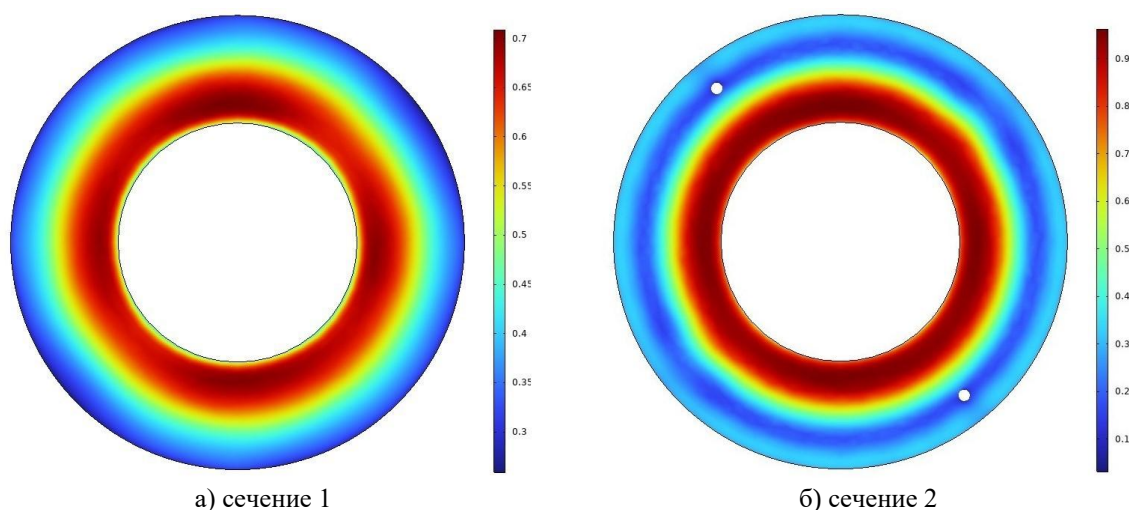


Рис. 5. Распределение скоростей при вертикальной подаче при $G = 0,05$ кг/с

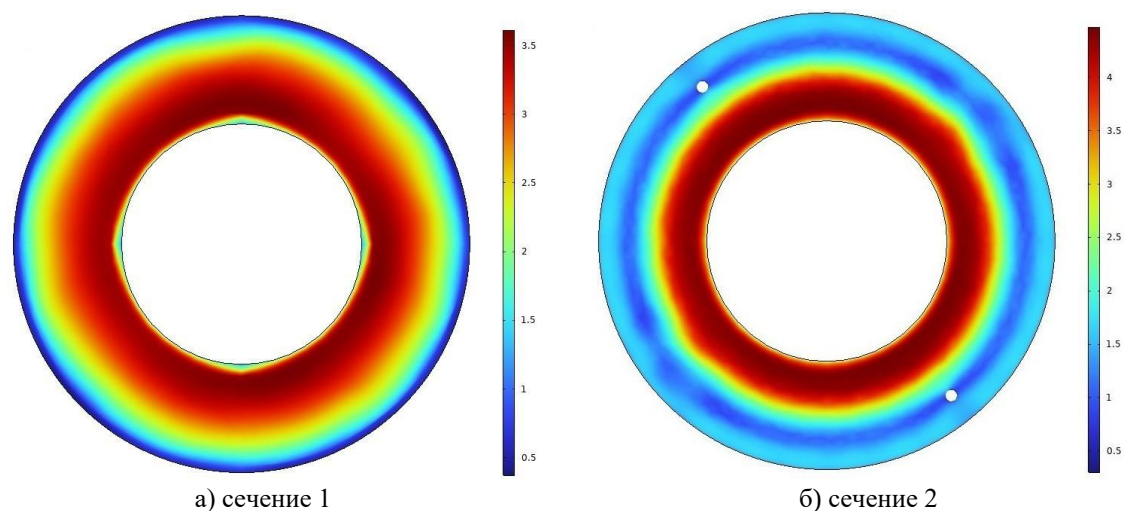
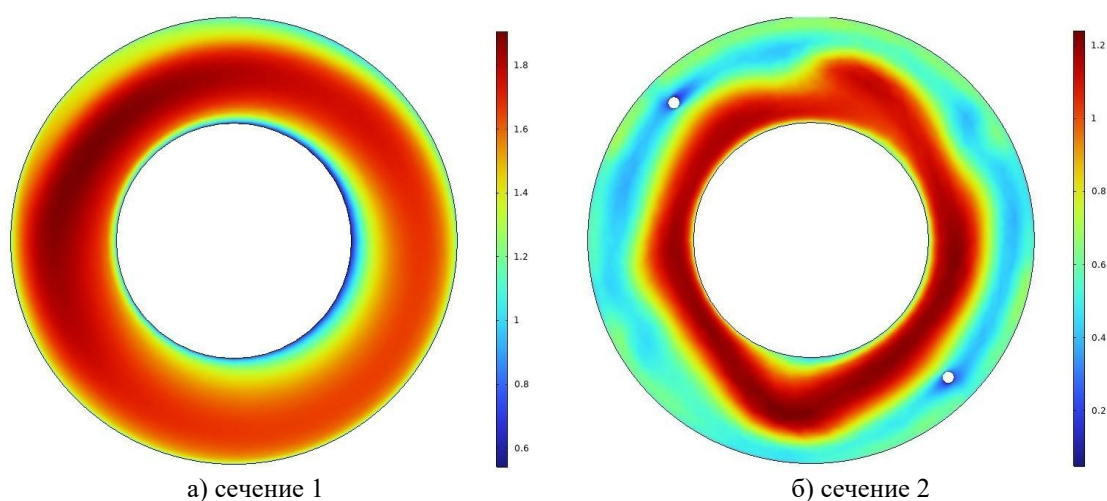
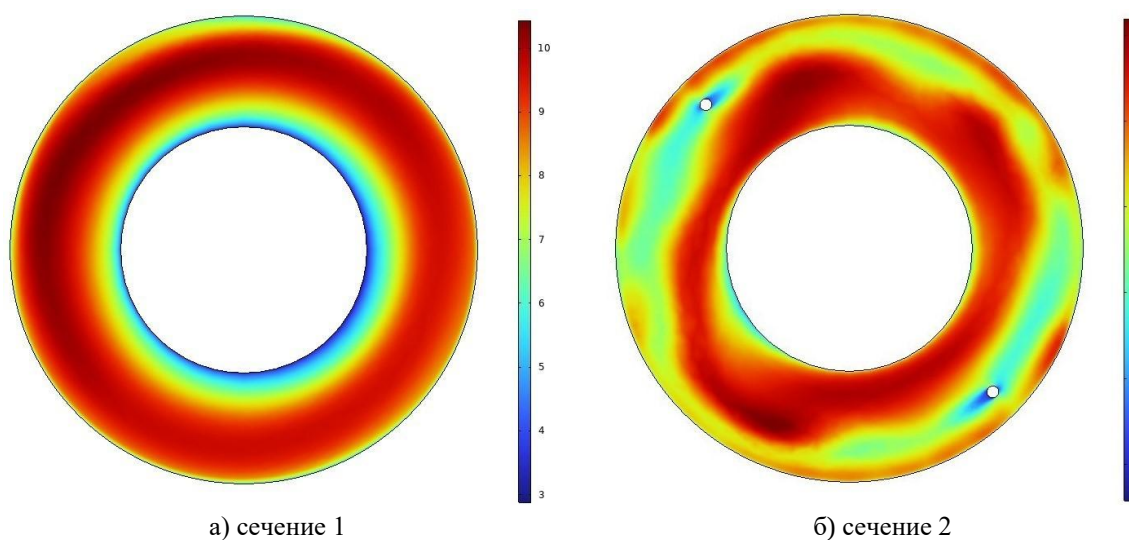


Рис. 6. Распределение скоростей при вертикальной подаче при $G = 0,25$ кг/с

Рис. 7. Распределение скоростей при вертикальной подаче при $G = 0,05$ кг/сРис. 8. Распределение скоростей при вертикальной подаче при $G = 0,25$ кг/с

Распределение потока воздуха в выходном сечении 2 при всех расходах одинаково и показывает, что воздух практически не проходит вблизи поверхности теплообменного элемента, расположенной у внешней стенки конструкции (рис. 5б, рис. 6б).

На рис. 7а и рис. 8а видно, что поток воздуха во входном сечении 1 распределён относительно равномерно и имеет закрученную структуру для всего исследуемого диапазона расхода.

Распределение потока воздуха в выходном сечении 2 (рис. 7б, рис. 8б) различно при разных расходах. При расходе $0,05$ кг/с поток воздуха проходит ближе к внутреннему цилиндру, омывая соответствующую поверхность теплообменного элемента. При расходе $0,25$ кг/с происходит значительное закручивание потока воздуха, центробежная сила возрастает, в результате чего поток более равномерно распределяется как по сечению, так и по всей поверхности теплообменного элемента, что приводит к увеличению потерь давления (рис. 4).

Выводы. Результаты исследования показывают, что рассматриваемый вариант конструкции теплообменного элемента для цилиндрических аппаратов с псевдооживленным слоем при вертикальной подаче воздуха применять нецелесообразно, так как основной поток воздуха интенсивно омывает только некоторую часть теплообменной поверхности, расположенную вблизи стенки внутреннего цилиндра. Закручивание потока при тангенциальной подаче позволяет более равномерно распределить поток по поверхности теплообменного элемента и по сечению аппарата в целом, что потенциально приведёт к более интенсивному процессу теплообмена.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боттерилл, Дж. Теплообмен в псевдооживленном слое: Гидродинамические характеристики псевдооживленного газом слоя и их влияние на его теплообменные свойства / Дж. Боттерилл; пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 344 с.
2. Патент № 2474777 С1 Российская Федерация, МПК F26B 17/10, F26B 3/084. Сушилка с псевдооживленным слоем с непрямым подогревом: № 2011125916/06: заявл. 24.11.2008; опубл. 10.02.2013 / Х. Й. Клутц, К. Мозер; заявитель РВЕ ПАУЭР АКЦИЕНГЕЗЕЛЛШАФТ. – EDN VSPNGA.
3. Патент на полезную модель RU 235886 U1, МПК F28D 13/00, F26B 3/084. Погружной теплообменный элемент для аппаратов с псевдооживленным слоем / А.А. Надеев, Н.Н. Кожухов, Д.А. Прутских; Воронеж. гос. техн. ун-т. – № 2025111792; заявлено 06.05.2025 г.; опубл. 17.07.2025 г.; Бюл. № 20. – 4 с.: ил. – EDN CUAWCU.
4. Исследование гидродинамики погружного теплообменного элемента с кольцевыми трубками для аппарата с псевдооживленным слоем / А. А. Надеев, Н. Н. Кожухов, Д. А. Прутских, В. Ю. Дубанин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 3. – С. 174-183. – DOI 10.5281/zenodo.17395039. – EDN SVZNSX.
5. Основы техники псевдооживления / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша, В. Б. Гельперин. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
6. Kuzmin, D. On the Implementation of the k-ε Turbulence Model in Incompressible Flow Solvers Based on a Finite Element Discretization / D. Kuzmin, O. Mierka, S. Turek, // Int'l J Computing Science and Mathematics. – 2007– Vol. 1. – No. 2–4. – P. 193-206.

REFERENCES LIST

1. Botterill, Dzh. Teploobmen v psevdoozhizhennom sloe: Gidrodinamicheskie kharakteristiki psevdoozhizhennogo gazom sloia i ikh vliianie na ego teploobmennye svoistva / Dzh. Botterill; per. s angl. – M.: Energiia, 1980. – 344 s.
2. Patent № 2474777 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK F26B 17/10, F26B 3/084. Sushilka s psevdoozhizhennym sloem s nepriamym podogrevom: № 2011125916/06: zaiaavl. 24.11.2008; opubl. 10.02.2013 / Kh. I. Klutts, K. Mozer; zaiaavitel RVE PAUER AKTsIENGEZELLShAFT. – EDN VSPNGA.
3. Patent na poleznuiu model RU 235886 U1, MPK F28D 13/00, F26B 3/084. Pogruzhnoi teploobmennyi element dlia apparatov s psevdoozhizhennym sloem / A.A. Nadeev, N.N. Kozhukhov, D.A. Prutskikh; Voronezh. gos. tekhn. un-t. – № 2025111792; zaiaвлено 06.05.2025 g.; opubl. 17.07.2025 g.; Biul. № 20. – 4 s.: il. – EDN CUAWCU.
4. Issledovanie gidrodinamiki pogruzhnogo teploobmennogo elementa s koltsevyimi trubkami dlia apparata s psevdoozhizhennym sloem / A. A. Nadeev, N. N. Kozhukhov, D. A. Prutskikh, V. Iu. Dubanin // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 3. – S. 174-183. – DOI 10.5281/zenodo.17395039. – EDN SVZNSX.
5. Osnovy tekhniki psevdoozhizheniia / N.I. Gelperin, V.G. Ainshtein, V.B. Kvasha, V. B. Gelperin. – M.: Khimiia, 1967. – 664 s.
6. Kuzmin, D. On the Implementation of the k-ε Turbulence Model in Incompressible Flow Solvers Based on a Finite Element Discretization / D. Kuzmin, O. Mierka, S. Turek, // Int'l J Computing Science and Mathematics. – 2007– Vol. 1. – No. 2–4. – P. 193-206.

Поступила в редакцию 01.04.2026 г., рекомендована к изданию 15.04.2026 г.

NUMERICAL SIMULATION OF THE AERODYNAMICS OF AN IMMERSIBLE HEAT EXCHANGE
ELEMENT WITH RING TUBES

Kozhukhov N.N., Nadeev A.A., Prutskikh D.A., Dubanin V.IU., Naumov A.M.

This paper presents the results of numerical simulations of airflow around a submersible heat exchanger with annular tubes, designed for fluidized bed systems. A flow simulation model for vertical and tangential airflow was developed and validated. The computational experiment resulted in the determination of pressure losses, an analysis of air velocity fields, and the determination of their extremes.

Keywords: heat exchange element, annular tubes, hydraulic characteristic, air flow.

Кожухов Николай Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: nnkozhukhov@cchgeu.ru

Kozhukhov Nikolai Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University, Russian Federation, Voronezh.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5235-9988>

Надеев Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: anadeev@cchgeu.ru

Nadeev Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University, Russian Federation, Voronezh.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6907-7610>

Прутских Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: dprutskikh@cchgeu.ru

Prutskikh Dmitrii Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University, Russian Federation, Voronezh.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5375-1455>

Дубанин Владимир Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: vdubanin@cchgeu.ru

Dubanin Vladimir IUrevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University, Russian Federation, Voronezh.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2271-2821>

Наумов Александр Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: anaumov@cchgeu.ru

Naumov Aleksandr Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University, Russian Federation, Voronezh.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2221-1266>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА С УЧЕТОМ ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ НЕЛИНЕЙНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

© 2026 Сайфутдинов Р.Х.

Наличие в электротехнических устройствах нелинейных индуктивностей может привести к феррорезонансу напряжений в электрической цепи с появлением опасных перенапряжений в ней и других нежелательных последствий. Условия возникновения феррорезонанса существенно зависят от инерционности нелинейной индуктивности. В цепи с безынерционной индуктивностью феррорезонанс возможен только при определенной форме тока. В подтверждение этого приведены результаты расчета на ЭВМ и физического эксперимента. При синусоидальной форме тока феррорезонанс возможен в цепи с инерционной индуктивностью. Физическая модель такой феррорезонансной цепи обоснована теоретически и проверена в натурном эксперименте.

Ключевые слова: математическая и физическая модели, инерционность нелинейной индуктивности, фазовый и энергетический критерий феррорезонанса, форма тока и напряжения.

Введение. Электрические элементы с нелинейными вольт-амперными характеристиками в электротехнических устройствах целенаправленно используют для совершения различных преобразований электрической энергии. К таким элементам относятся, например, электронные полупроводниковые приборы, обмотки с насыщенными стальными сердечниками. С другой стороны, естественная и неустранимая нелинейность характеристик некоторых элементов электрической цепи приводит к таким нежелательным последствиям, как искажение формы тока, неравномерность движения электромеханических устройств, увеличение электрических и магнитных потерь и т. п.

Одним из специфических эффектов в электрических цепях переменного тока является феррорезонанс [1], который, в том числе, может вызывать аварийные режимы в электроустановках [2, 3]. Несмотря на большое число исследований на эту тему, решение проблемы, как справедливо отмечено, например в [3], до сих пор не найдено. Причиной этого представляется недостаточная глубина предыдущих исследований именно с точки зрения теоретической электротехники, в частности, игнорирование инерционных свойств нелинейных реактивных элементов цепи (индуктивности). При этом без внимания часто остаются формы мгновенных значений токов и напряжений, которые напрямую определяют полный обмен энергией между индуктивностями и емкостями, т. е. режим резонанса.

Даже в тех исследованиях, например [3, 4], где получены формы мгновенных значений токов и напряжений на реактивных элементах, внимание на их совпадение для возникновения именно феррорезонанса, т. е. одного режима, не обращается. При этом часто термин «феррорезонанс» необоснованно приписывают явлению триггерного эффекта, т. е. резкому переходу от одного режима, например дорезонансного, к другому, послерезонансному режиму [1]. Теоретическая невозможность достижения истинного феррорезонанса в указанных и других исследованиях объясняется, как показано ниже, использованием синусоидальной, а не специально подобранной формой мгновенных значений напряжения источников питания резонансных цепей.

Для возникновения резонанса цепь должна содержать реактивные элементы – емкость и индуктивность. Как известно, критерием резонанса в линейных цепях является совпадения по фазе тока и напряжения на выводах реактивного резонансного двухполюсника. При этом регулирование действующих (амплитудных) значений тока и напряжения не приводят к резонансу в линейной цепи.

Особенностью феррорезонанса является то, что он может возникнуть при изменении напряжения источника электроэнергии или силы тока в нелинейной резонансной цепи. Это объясняется тем, что за счет нелинейности вольт-амперной характеристики индуктивности, отношение напряжения на ней к её току, т. е. её реактивное сопротивление, изменяется вместе с этими напряжением и током. При некотором напряжении (токе) сопротивления индуктивности и емкости станут одинаковыми, что приведет к резонансу с полным обменом энергией между реактивными элементами цепи. При исследовании феррорезонанса принципиально важным, как показано ниже, является учет инерционных свойств нелинейной индуктивности. Однако теоретическая часть этого вопроса в научно-технической литературе освещена недостаточно. Эта недостаточность проявляется в использовании различных упрощений явления – гладкие нелинейные характеристики заменяются кусочно-линейными, несинусоидальные токи заменяются эквивалентными синусоидами и т. п. Это приводит не только к количественным погрешностям анализа, что некритично для теории явления, но и к потере принципиально важных составляющих процесса. Следствием этого на практике являются недостаточно обоснованные, например антирезонансные, технические решения.

В данном теоретическом исследовании выбрана цепь с последовательным соединением линейной емкости и нелинейной индуктивности, дополненная активным сопротивлением, которое учитывает потери в реальной катушке с ферромагнитным сердечником. В такой цепи технически проще измерять, в том числе осциллографировать, несинусоидальные параметры. Здесь течет один электрический ток, для получения осциллограммы которого требуется дополнительно только один измерительный шунт (далее на схемах не показан), а осциллограммы напряжений получают подключением осциллографа к соответствующим точкам цепи. Однако, исследованные здесь факторы теории феррорезонанса справедливы для параллельного соединения линейной емкости и нелинейной индуктивности [1], а также для более сложных электрических цепей с их наличием. Это обусловлено тем, что данное исследование основано на применении законов Кирхгофа, составленных именно для мгновенных значений токов и напряжений, которые справедливы для любых электрических цепей.

Цель описанного здесь моделирования – выявить влияние инерционных свойств нелинейной индуктивности на условия возникновения феррорезонанса, которые недостаточно учтены в классической теории этого явления. Это позволит внести теоретическую ясность в сущность данного явления и использовать разработанные здесь модели феррорезонансных цепей для исследования конкретных технических устройств.

Модель безынерционной цепи. В электроустановках чаще встречаются безынерционные нелинейные индуктивности, например обмотки на ферромагнитных сердечниках. Нелинейность их электрических характеристик обусловлена нелинейностью магнитной характеристики сердечники за счет его магнитного насыщения. Для каждого нового мгновенного значения переменного тока в таких обмотках магнитное поле в них изменяется практически в тот же миг, что приводит к безынерционному изменению их индуктивности и, соответственно, реактивного

сопротивления. Поэтому динамические характеристики для мгновенных значений токов и напряжений подобных обмоток являются нелинейными [1].

Это приводит к нелинейным искажениям, т. е. формы тока и напряжения на такой индуктивности не совпадают за счет появления новых гармонических составляющих. На линейной емкости резонансной цепи могут появиться только линейные искажения. Они также приводят к несовпадению форм тока и напряжения на такой емкости, но уже за счет непропорционального изменения амплитуд и начальных фаз исходных гармонических составляющих. Поэтому при одном и том же токе произвольной формы в безынерционной индуктивности и линейной емкости, формы напряжений на них в общем случае не совпадут. Для пояснения этого с помощью одной из программ компьютерной математики на ЭВМ исследована математическая модель лабораторной установки, схема замещения и параметры которой показаны на рис. 1.

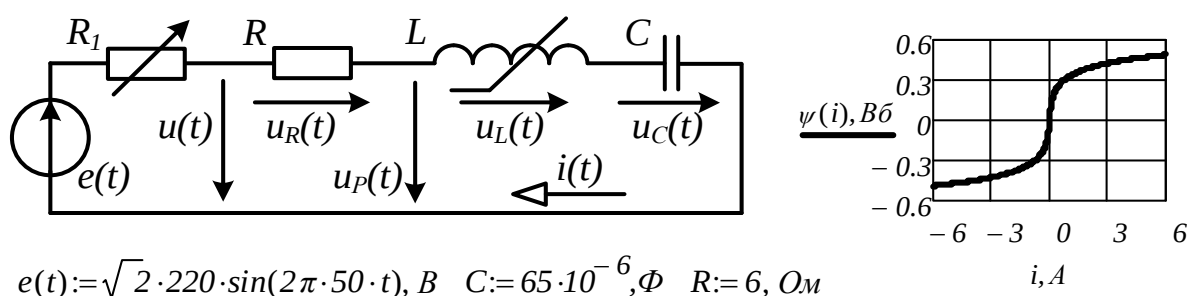


Рис. 1. Феррорезонансная цепь и ее параметры

В этой установке использована катушка индуктивности в виде обмотки на тороидальном стальном магнитопроводе. Экспериментальная вебер-амперная характеристика этой катушки на рис. 1 представлена в виде математической функции $\psi_L(i)$, которая практически точно повторяет реальную характеристику. Активное сопротивление катушки R на практике почти не зависит от тока, поэтому принято линейным. Сопротивление R_1 на этой схеме предназначено для регулирования силы тока в цепи.

Математическое моделирование проведено по известным электротехническим уравнениям в дифференциальной форме для мгновенных значений тока и напряжений. Решения получены на ЭВМ проверенными численными методами для нескольких сотен точек на каждом периоде исследуемых параметров. По сути, проведен расчет переходного процесса методом переменных состояния в цепи при подключении к ней синусоидальной ЭДС $e(t)$. Такой подход исключает влияние на результаты каких-либо существенных физических допущений и ощутимых вычислительных погрешностей.

Результаты моделирования для одного из значений тока после окончания переходного процесса представлены на рис. 2а. Как видно из графиков на этом рисунке, за счет указанных выше искажений, формы напряжений на элементах цепи отличаются как от формы тока, так и между собой. Действующее значение тока (2,75 А на рис. 2а) в этом численном эксперименте подобрано с помощью сопротивления R_1 так, что действующие значения напряжений на реактивных элементах цепи совпали (129 В).

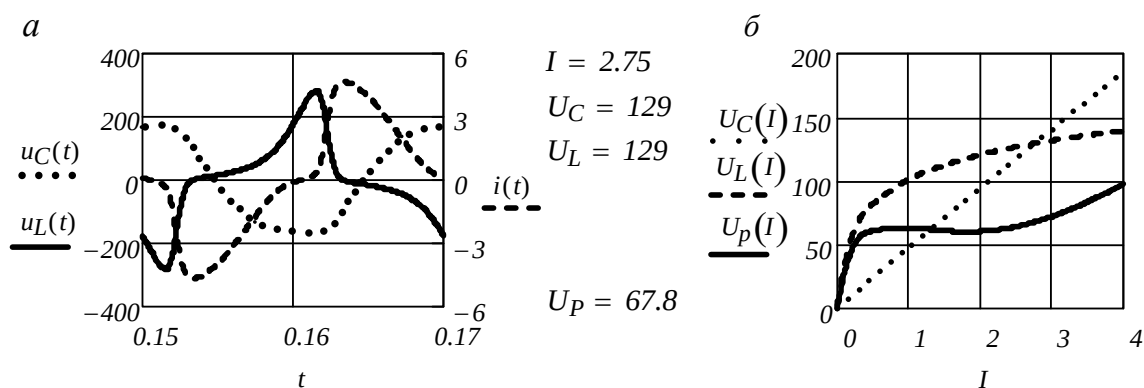


Рис. 2. Напряжения и ток в нелинейной безынерционной цепи:
а) волновая диаграмма; б) вольт-амперные характеристики

Однако равенство действующих значений этих реактивных напряжений в последовательной ветви схемы не приводит к их взаимной компенсации, т. е. действующее значение суммы их мгновенных значений отлично от нуля:

$$U_P = \sqrt{\frac{1}{0,02} \int_{0,015}^{0,017} (u_L(t) + u_C(t))^2 dt} = 67,8 \text{ В.}$$

Причина неполной компенсации реактивных напряжений заключается в их разной форме. Это приводит также к несовпадению мгновенных мощностей на реактивных элементах цепи $p_L(t) = u_L(t) \cdot i(t)$, $p_C(t) = u_C(t) \cdot i(t)$ при одном и том же токе в них и неполному обмену энергией между ними, т. е. к отсутствию резонанса.

Серия подобных вычислений при различных значениях R_l позволила получить для реактивных элементов вольт-амперные характеристики в действующих значениях и действующее значение суммы их мгновенных значений $U_P(I)$ (рис. 2б). Они показывают, что полной компенсации реактивных напряжений не наблюдается ни при каком значении тока I . Едва заметный минимум на характеристике $U_P(I)$ здесь никак не связан с напряжением на активных элементах цепи (они здесь вынесены за рамки результатов расчета) и определяется только чуть более ощутимой, но далеко не полной компенсацией противофазных реактивных напряжений, по сравнению с другими точками этой характеристики.

Таким образом, при питании безынерционной нелинейной цепи от источника синусоидальной ЭДС и при установившейся в ней форме тока, за счет различия форм реактивных напряжений, в общем случае невозможен полный обмен энергией между реактивными элементами, т. е. невозможен феррорезонанс. На этой математической модели проведены также исследования и при других произвольных, т. е. несинусоидальных переменных ЭДС $e(t)$, которые дали схожие теоретические результаты.

С целью практического подтверждения результатов моделирования на ЭВМ проведен натурный эксперимент с указанной катушкой индуктивности по схеме и с параметрами, представленными на рис. 1. При регулировании силы тока зарегистрированы действующие значения напряжений на элементах цепи и фазовый сдвиг между током $i(t)$ и напряжением $u(t)$ резонансной ветви. Вольт-амперные

характеристики участков цепи в действующих значениях показаны на рис. 3а; точками здесь, и на последующих экспериментальных характеристиках, обозначены измеренные значения параметров.

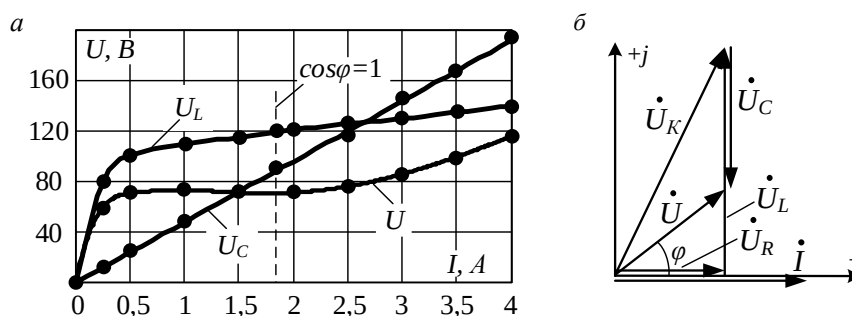


Рис. 3. Экспериментальные характеристики безынерционной цепи:
а) вольт-амперные характеристики; б) векторная диаграмма

При силе тока $I = 1,82 \text{ A}$ (вертикальная пунктирная линия на рис. 3а) фазометр показал угол сдвига фаз между током и напряжением $\varphi = 0$. Напряжение на катушке составило 122 B , включая вычисленные составляющие: индуктивная $U_L = 121,4 \text{ B}$ (рис. 3б), активная $U_R = 12,5 \text{ B}$. Напряжение на емкости $U_C = 87 \text{ B}$ при этом оказалось гораздо меньше индуктивного напряжения. Результирующее напряжение резонансной ветви $U = 75 \text{ B}$ и $U_R = 12,5 \text{ B}$ существенно различаются, чего не должно быть при фазовом резонансе. Эксперимент показал – несмотря на то, что здесь $\varphi = 0$, этот режим не является резонансным. Сравнение графиков на рис. 2б и на рис. 3а показывает их практически аналогичный вид, что дает уверенность в методе моделирования и в теоретических выводах из его результатов.

Указанные измерения произведены, в том числе, трехфазным цифровым электроизмерительным прибором в его однофазном подключении к резонансной ветви. Показания этого прибора $I = 1,82 \text{ A}$, $U = 71 \text{ B}$, $\varphi = 0$ и векторная диаграмма тока и напряжения (совпадают по фазе) представлены на рис. 4а.

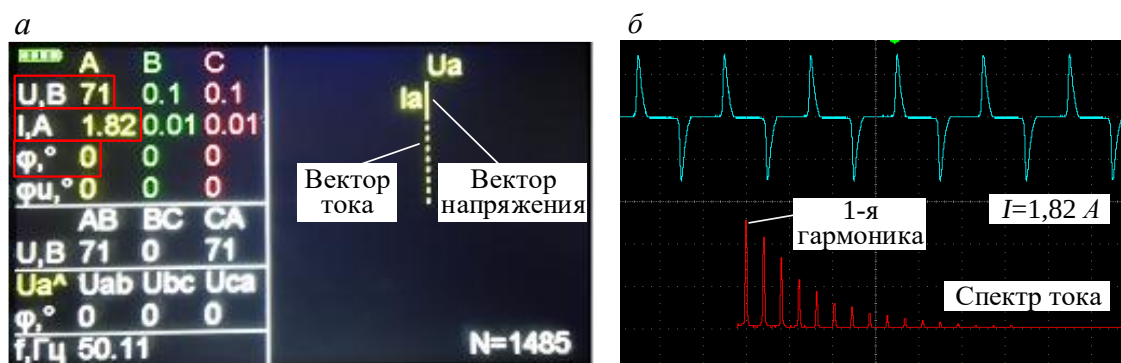


Рис. 4. Параметры безынерционной нелинейной цепи:
а) экран цифрового прибора; б) осциллограмма тока и его амплитудно-частотный спектр

За счет нелинейности динамической вольт-амперной характеристики индуктивности для мгновенных значений, форма тока ожидаемо оказалась резко несинусоидальной для этого режима (рис. 4б). Это дополнительно подтверждается наличием в его амплитудно-частотном спектре кроме первой (основной) гармоники,

также большого количества высших гармоник. Данный опыт подтверждает более сложный характер процессов, протекающих в безынерционной нелинейной цепи, чем это принято при их толковании на основе векторных диаграмм и показывает неприменимость здесь фазового критерия резонанса.

Дело в том, что классический анализ с помощью векторных диаграмм подразумевает замену реальных несинусоидальных токов и напряжений эквивалентными синусоидами, действующие значения которых такие же, как и у реальных несинусоидальных токов и напряжений. Поскольку в рассматриваемом случае решающее значение имеют именно форма тока и напряжений, то их векторное представление не позволяет адекватно моделировать исследуемые здесь процессы. Такое использование эквивалентных синусоид и векторных диаграмм следует трактовать как некорректное расширение результатов частного случая синусоидальных токов и напряжений на более общие закономерности для несинусоидальных токов и напряжений. Этот подход противоречит как формальной логике, так и практике. В качестве обобщения можно констатировать, что феррорезонанс в цепи безынерционной индуктивностью при синусоидальной и другой произвольной форме ЭДС теоретически и практически невозможен.

Тем не менее, резонанс в такой безынерционной цепи все-таки достижим, но только при определенной форме несинусоидальной тока, которая зависит от вида вебер-амперной характеристики индуктивности. При этой форме тока и определенной его амплитуде нелинейные искажения напряжения $u_L(t)$ и линейные искажения напряжения $u_C(t)$ приведут к полному их совпадению по форме и амплитуде (с учетом фазового сдвига на половину периода). Такой ток может установиться, в частности, естественным образом в безынерционной нелинейной электрической цепи при переходном процессе в ней на короткое время. По этой методике, описанной в [5], вычислена форма несинусоидальной ЭДС $e(t)$, требуемая для возникновения истинного резонанса в цепи по рис. 1. Результаты численного моделирования приведены на рис. 5.

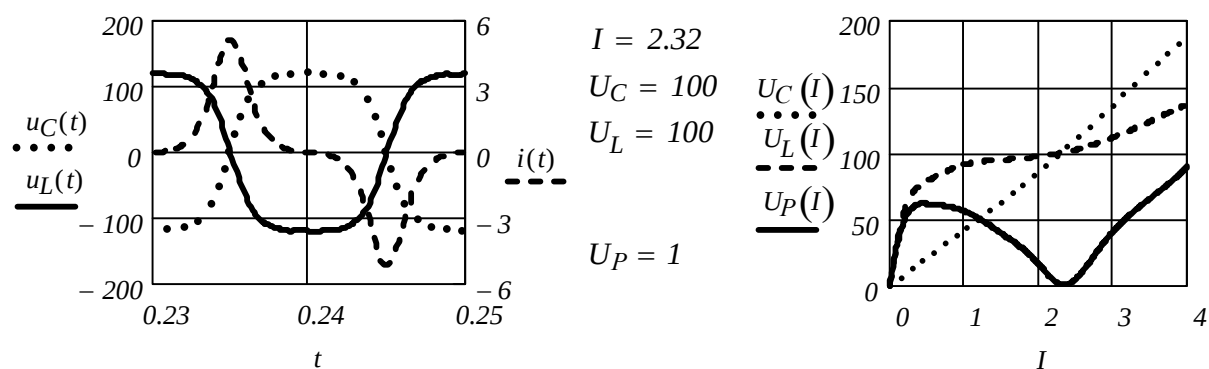


Рис. 5. Напряжения и ток в нелинейной безынерционной цепи

Сравнение этих результатов с характеристиками, представленными на рис. 2, полностью подтверждает изложенные выше теоретические положения о необходимости совпадения противофазных реактивных напряжений не только по амплитуде, но и по форме для возникновения истинного феррорезонанса в безынерционной цепи.

Модель инерционной цепи. Что касается инерционности нелинейных индуктивностей, то она чаще всего обусловлена взаимным механическим перемещением их частей. Примерами инерционных индуктивностей могут служить подвижные катушки измерительных приборов электромагнитной системы и обмотки тяговых

электромагнитов переменного тока. Инерционная индуктивность имеет нелинейную динамическую характеристику для медленно изменяющихся действующих значений переменных токов и напряжений. Поэтому её реактивное сопротивление изменяется вместе с действующим значением тока и напряжения, что и требуется для физической модели. Однако, описаний практических экспериментов феррорезонансных цепей с такими индуктивностями обнаружить не удалось.

Динамическая характеристика для быстро изменяющихся мгновенных значений переменного тока и напряжения остается при этом линейной. Данное обстоятельство дает возможность проводить эксперимент при общедоступной синусоидальной форме переменного тока, регулируя его действующее значение простыми способами, например реостатом.

При синусоидальном токе сохраняется возможность использования широко распространенных электроизмерительных приборов, в том числе фазометра для регистрации резонанса. При инерционной нелинейной индуктивности и синусоидальном токе формы напряжений на реактивных элементах сохраняют свою синусоидальность (в отличие от показанных на рис. 2), поэтому полный обмен энергией между ними, т. е. нелинейный энергетический резонанс, совпадет с фазовым резонансом – подобно резонансу в линейных цепях.

Общий подход к созданию модели инерционной феррорезонансной цепи приведен в [6]. Как известно из теории магнитных цепей, индуктивность катушки, намотанной на стальном сердечнике, приближенно описывается выражением:

$$L = W \frac{\Phi}{I} = W^2 \frac{B \cdot S}{I \cdot W} = W^2 \frac{B \cdot S}{H \cdot l} = \frac{W^2 \cdot B \cdot S}{(B \cdot l) / (\mu \cdot \mu_0)} = W^2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \frac{S}{l}, \quad (1)$$

где W – число витков катушки; Φ – магнитный поток; I – ток; B – магнитная индукция; S – площадь поперечного сечения сердечника; l – длина средней линии сердечника; μ – магнитная проницаемость сердечника; μ_0 – магнитная постоянная.

Для катушки индуктивности простым и эффективным способом получения инерционной нелинейности является автоматическое изменение числа её витков перемещением подвижного контакта с помощью электродвигателя в зависимости от величины напряжения или тока катушки. Для изготовления инерционной нелинейной индуктивности использована та же катушка, что и в предыдущем опыте, снабженная дополнительными элементами. Конструкция этой катушки представлена на рис. 6а.

В ней на стальном кольцевом сердечнике изолированным проводом выполнена однослойная обмотка с выводами 1 и 2. Соседние витки обмотки плотно прилегают друг к другу – «виток к витку». Соосно кольцевому сердечнику расположен вал электродвигателя переменного тока. На этом валу через изолирующую прокладку закреплен бронзовый рычаг с графитовым роликом на конце – подвижный контакт. Этот ролик при повороте вала электродвигателя на некоторый угол движется по зачищенной от изоляции поверхности однослойной обмотки, переключая число её витков между выводом 3 (от рычага и ролика) и выводами 1 и 2. Так, например, если вал электродвигателя повернется по часовой стрелке, то число витков между выводами 3 и 1 уменьшится, а между выводами 3 и 2 – увеличится.

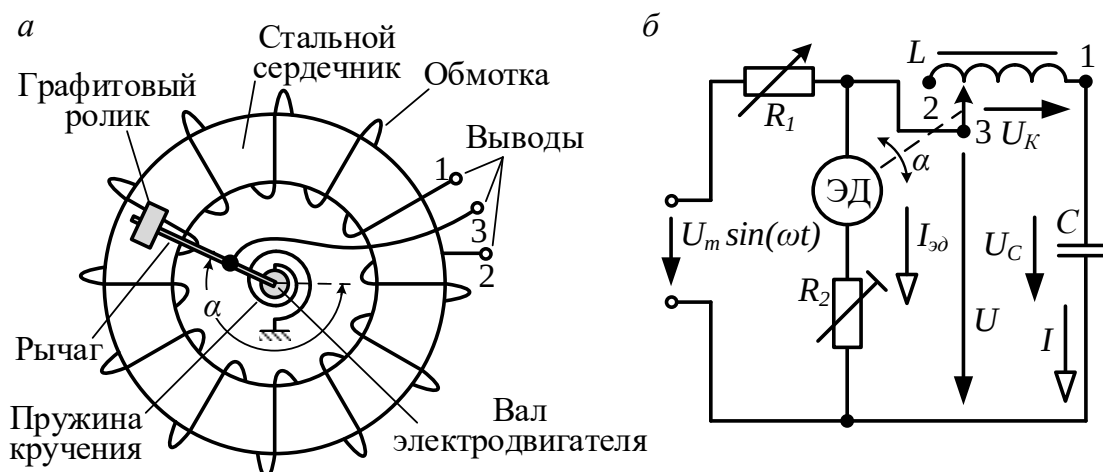


Рис. 6. Экспериментальная установка:
а) конструкция инерционной нелинейной индуктивности; б) электрическая схема

Для перемещения подвижного контакта использован коллекторный электродвигатель переменного тока с последовательным возбуждением. Для получения функциональной связи между током электродвигателя $I_{эд}$ (рис. 6б) и углом α перемещения его ротора (в пределах одного оборота), вращающий момент электродвигателя $M_{эд}$ уравновешен тормозящим моментом M_{np} цилиндрической пружины кручения. Один конец пружины закреплен на валу электродвигателя, а другой конец – на его статоре (на рис. 6а не показан), причем статор, сердечник и обмотка катушки закреплены на общем основании установки неподвижно.

При такой конструкции каждому значению тока $I_{эд}$ будет соответствовать некоторый установившийся угол α , который соответствует равенству между вращающим и тормозящим моментами системы: $M_{эд} = M_{np}$. С учетом известных характеристик двигателя и цилиндрической пружины кручения установлена функциональная связь между током электродвигателя $I_{эд}$ и углом α :

$$M_{эд} = k_{эд} I_{эд}^2, \quad M_{np} = k_{np} \alpha, \quad \alpha = \frac{k_{эд}}{k_{np}} I_{эд}^2, \quad (2)$$

где $k_{эд}$, k_{np} – постоянные коэффициенты, определяемые конструкцией электродвигателя и пружины соответственно.

Количество витков рабочей части обмотки W_{13} , заключенной между её выводами 1-3, зависит от общего числа витков W_{12} между выводами 1-2 и числа витков нерабочей части W_{23} между выводами 2-3, поэтому с учетом (2):

$$W_{13} = W_{12} - W_{23} = W_{12} - W_{12} \frac{\alpha}{2\pi} = W_{12} \left(1 - \frac{k_{эд}}{2\pi \cdot k_{np}} I_{эд}^2\right). \quad (3)$$

Подстановка формулы (3) в выражение (1) даёт зависимость индуктивности рабочей части катушки от тока электродвигателя:

$$L = L_{13} = W_{13}^2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \frac{S}{l} = \left[W_{12} \left(1 - \frac{k_{\text{эд}}}{2\pi \cdot k_{\text{пр}}} I_{\text{эд}}^2 \right) \right]^2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \frac{S}{l}. \quad (4)$$

Как видно из (4), в данной конструкции имеется существенная функциональная зависимость индуктивности от тока. При выводе формулы (4) не учтены незначительные тормозящие моменты от трения в электродвигателе и подвижном контакте. Для их уменьшения относительно $M_{\text{эд}}$ и $M_{\text{пр}}$ в данной конструкции применен электродвигатель с большим вращающим моментом и пружина с большой жесткостью.

С целью сохранения линейной динамической характеристики для мгновенных значений синусоидального тока и синусоидальной формы напряжения на индуктивности, требуется ограничить диапазон регулирования тока при эксперименте начальным линейным участком вольт-амперной характеристики катушки, т. е. обеспечить в (4) $\mu = \text{const}$ в указанном диапазоне.

Схема для исследования феррорезонанса (рис. 6б) кроме инерционной индуктивности содержит линейную емкость и два регулирующих резистора. С помощью изменения R_1 производится одновременное и связанное регулирование тока I в резонансной ветви и тока электродвигателя $I_{\text{эд}}$. При этом вместе с изменением тока I в резонансной ветви изменяется индуктивность катушки L согласно (4), что и требуется для эксперимента. Подстроечный резистор R_2 предназначен для установления определенной зависимости между током I в резонансной ветви и током электродвигателя $I_{\text{эд}}$ при регулировании R_1 . Эта зависимость должна ограничить ток I начальным линейным участком вольт-амперной характеристики катушки при необходимой (не более одного оборота) величине угла α согласно (2). Подстройку резистора R_2 можно выполнить опытным путем визуально для угла α и по показаниям амперметра (на рис. 6б он не изображен) для тока I .

Как видно из рис. 3а, начальный линейный участок вольт-амперной характеристики катушки ограничен силой тока менее 0,5 А. Для уточнения границ этого участка проведен опыт по определению семейства вольт-амперных характеристик катушки при четырех фиксированных положениях её подвижного контакта 3. Для каждой характеристики семейства выбраны следующие доли чисел витков рабочей части обмотки W_{13} от общего числа витков W_{12} : 100%, 75%, 50% и 25%. Результаты опыта показаны на рис. 7а.

На основании этих характеристик линейными можно считать их участки для силы тока в пределах от нуля до 125 мА. Контрольная осциллограмма тока в этом диапазоне показала его практически синусоидальную форму, что подтверждается незначительными амплитудами высших гармоник в его амплитудно-частотном спектре по отношению к первой гармонике (рис. 7б).

С учетом линейных участков безынерционных вольт-амперных характеристик катушки и её инерционной нелинейности при работе совместно с электродвигателем в схеме по рис. 6б экспериментально получена зависимость действующего значения напряжения на катушке от действующего значения тока в ней, приведенная на рис. 8а.

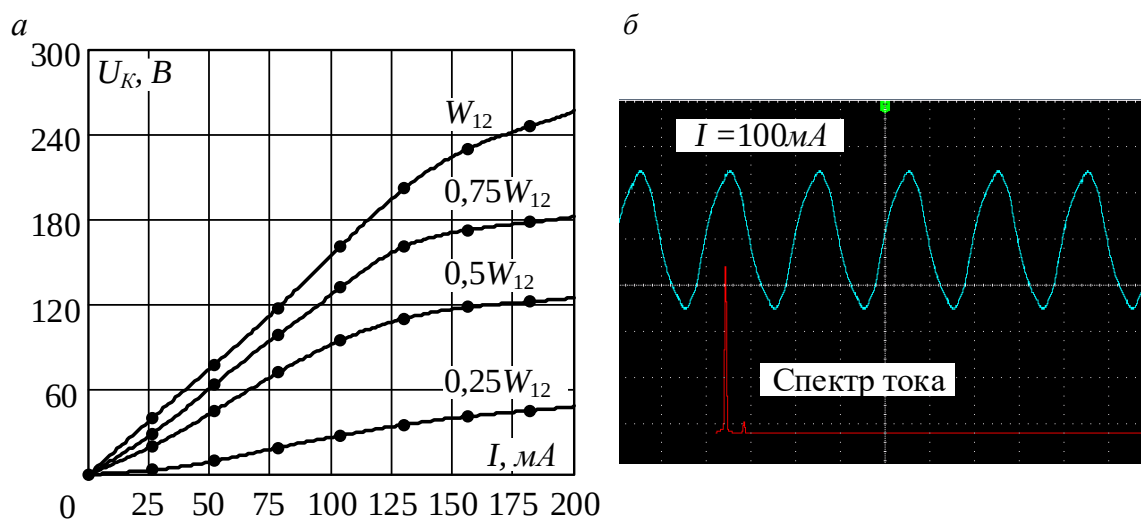


Рис. 7. Параметры катушки на линейных участках характеристик:
а) семейство вольт-амперных характеристик; б) осциллограмма тока и его амплитудно-частотный спектр

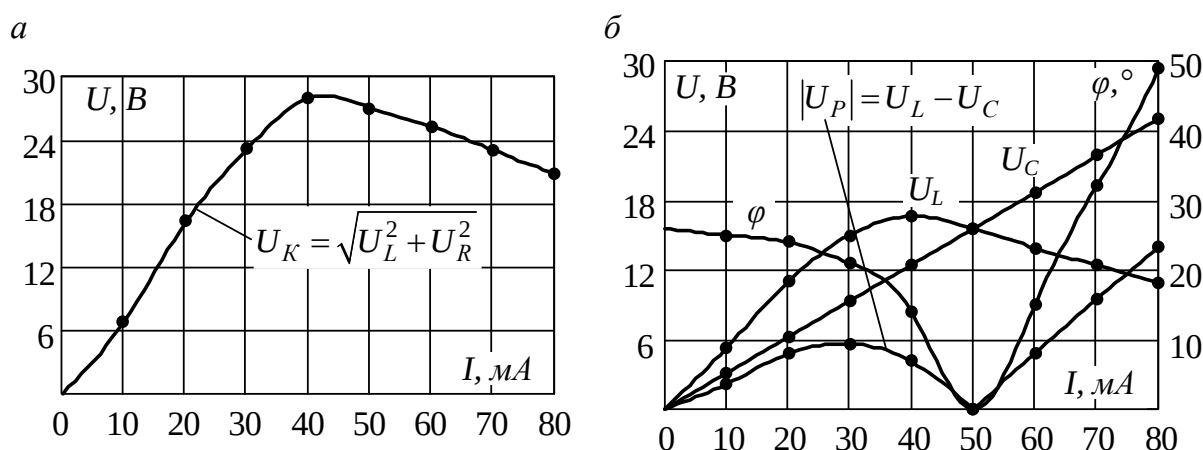


Рис. 8. Характеристики резонансной цепи:
а) вольт-амперная характеристика катушки; б) характеристики резонансной ветви

Падающий участок этой характеристики $U_K = Z_K(I) \cdot I$ обусловлен тем, что при линейном нарастании тока индуктивность (и индуктивное сопротивление в $Z_K(I)$) рабочей части обмотки W_{13} уменьшается в степенной зависимости (4) от этого тока, т. е. опережающим темпом относительно роста тока. К тому же, уменьшается и активное сопротивление рабочей части обмотки W_{13} , что дополнительно влияет на вид этой характеристики. Указанная характеристика экспериментально подтверждает работоспособность предложенной конструкции и пригодность её для исследования феррорезонанса инерционной электрической цепи.

С целью получения истинного феррорезонанса в инерционной цепи по рис. 6б, с учетом ожидаемой синусоидальной (одинаковой) формы тока и напряжений в ней, проведен следующий эксперимент. Для нескольких значений тока I измерены напряжения U, U_K, U_C и угол сдвига фаз ϕ между током I и напряжением U , результаты эксперимента представлены на рис. 8б. Поскольку индуктивную

составляющую U_L напряжения катушки U_K отдельно измерить невозможно (рис. 8а), она вычислена известными методами (рис. 3б).

В данном эксперименте достигнута следующая цель – при изменении действующего значения тока (синусоидального, а не специальной формы) для некоторого его значения (50 мА) одновременно выполнились два условия: $U_L = U_C$ и $\varphi = 0$ (в отличие от результатов опыта на рис. 3а). При этом зависимость реактивной составляющей напряжения резонансной ветви U_p от тока I приняла канонический вид, который соответствует векторной диаграмме рис. 3б.

В подтверждение результатов этого эксперимента, дополнительно к данным показывающих электроизмерительных приборов (амперметра, фазометра), зарегистрированы следующие осциллограммы для резонансного режима цепи. На рис. 9а для этого режима зафиксировано полное совпадение фаз тока I и напряжения U и практически одинаковая их форма.

На рис. 9б для резонансного режима зафиксировано почти противофазное состояние синусоид напряжений на катушке и емкости. Здесь начальная фаза $u_C(t)$ составляет -90° , а начальная фаза $u_K(t)$ несколько отличается от идеального для резонанса значения $+90^\circ$. Это связано с тем, что катушка обладает кроме индуктивного еще и активным сопротивлением, т. е. $u_K(t) = u_L(t) + u_R(t)$. По этой же причине амплитуда $u_K(t)$ несколько больше, чем амплитуда $u_C(t)$. Здесь более общий энергетический критерий резонанса совпадает с его частным случаем – фазовым критерием резонанса. Таким образом, полученные опытные результаты полностью совпадают с изложенной здесь теорией – нелинейный резонанс при синусоидальном токе возможен только при использовании инерционного нелинейного реактивного элемента в резонансной цепи.

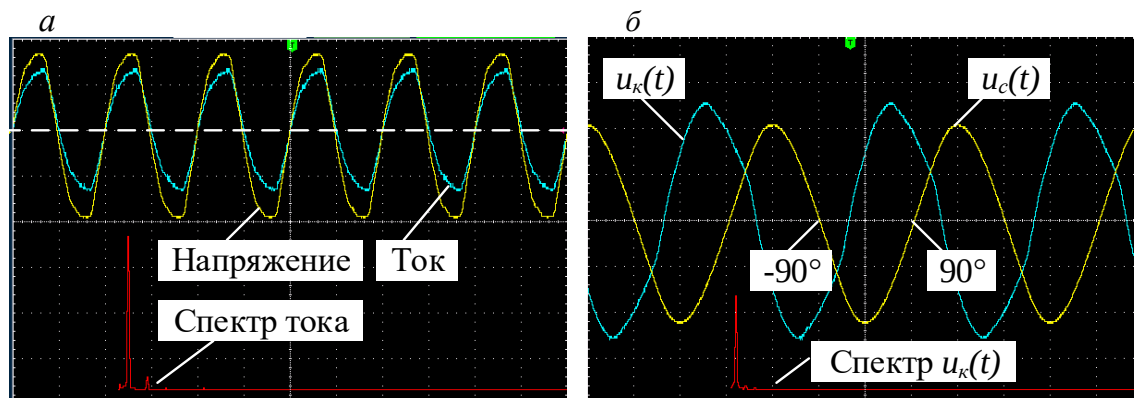


Рис. 9. Осциллограммы для резонансного режима:

а) нулевой фазовый сдвиг между током и напряжением; б) напряжения на элементах резонансной ветви

В дальнейших исследованиях для более широкого освещения вопроса феррорезонанса необходимо провести натурные эксперименты и с безынерционной нелинейной индуктивностью при специально подобранной форме тока согласно [5]. Для этого необходимо создание источника такого тока достаточной мощности и с приемлемыми метрологическими параметрами. Возможный способ технической реализации лабораторного источника питания с наперед заданной формой несинусоидального напряжения, а значит и тока в резонансной цепи, представлен в [7].

Выводы. Инерционные свойства нелинейной индуктивности цепи решающим образом влияют на условия возникновения феррорезонанса в ней. Феррорезонанс с участием безынерционной индуктивности невозможен при синусоидальной и другой произвольной форме ЭДС или тока источника электропитания этой резонансной цепи. Потому ошибочно пытаться на практике зафиксировать такой резонанс по показаниям вольтметров, амперметра и фазометра. Метод эквивалентных синусоид и векторных диаграмм в нелинейной безынерционной резонансной цепи может привести к противоречивым результатам анализа. Классическая теория феррорезонанса справедлива только для цепей с инерционными нелинейными индуктивностями. Истинный феррорезонанс с участием безынерционного реактивного элемента возможен при специальной форме ЭДС или тока источника электропитания резонансной цепи.

В целом, результаты проведенного здесь моделирования с учетом инерционных свойств нелинейной индуктивности, вносят определенную теоретическую ясность в сущность феррорезонансного режима, а разработанные здесь модели могут быть использованы для исследования реальных электротехнических устройств и принятия в них конкретных, например антирезонансных, мер.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. – 4-е изд. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.
2. СТО 56947007-29.240.10.191-2014. Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6-750 кВ: утв. и введен в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 19.11.2014 № 522.
3. Зилес, Л. Д. Физические основы и методы расчета феррорезонанса / Л. Д. Зилес // Электротехника. – 2022. – № 4. – С. 54–61.
4. Подберезная, И. Б. Моделирование феррорезонансных режимов в нелинейных электрических цепях с учетом магнитного гистерезиса / И. Б. Подберезная, А. Н. Ткачев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 1. – С. 13–24.
5. Сайфутдинов, Р. Х. Условия возникновения феррорезонанса напряжений в электрооборудовании / Р. Х. Сайфутдинов // Электропривод на транспорте и в промышленности : тр. II Всерос. науч.-практ. конф. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2018. – С. 388–394.
6. Адигамов, Е. А. Феррорезонанс в инерционной нелинейной электрической цепи / Е. А. Адигамов, Р. Х. Сайфутдинов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием (Хабаровск, 19–22 апреля 2022 г.). В 2 т. Т. 2 / под ред. А. Р. Едигаряна. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2022. – С. 47–50.
7. Гончар, Л. Д. Программно-аппаратный генератор несинусоидальных сигналов с мощным выходом / Л. Д. Гончар, Р. Х. Сайфутдинов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием (Хабаровск, 18–21 апреля 2023 г.). В 2 т. Т. 2 / под ред. И. В. Игнатенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2023. – С. 12–16.

REFERENCES LIST

1. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: v 3-kh t. Uchebnik dlia vuzov. Tom 2. – 4-e izd. / K. S. Demirchian, L. R. Neiman, N. V. Korovkin, V. L. Chechurin. – SPb.:Piter, 2003. – 576 s.
2. STO 56947007-29.240.10.191-2014. Metodicheskie ukazaniia po zashchite ot rezonansnykh povyshenii napriazheniia v elektroustanovkakh 6-750 kV: utv. i vveden v deistvie prikazom OAO «FSK EES» ot 19.11.2014 № 522.
3. Ziles, L. D. Fizicheskie osnovy i metody rascheta ferreazonansa / L. D. Ziles // Elektrotekhnika. – 2022. – № 4. – S. 54–61.
4. Podbereznaia, I. B. Modelirovanie ferreazonansnykh rezhimov v nelineinykh elektricheskikh tsepiakh s uchetom magnitnogo gisterezisa / I. B. Podbereznaia, A. N. Tkachev // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. – 2022. – T. 65. – № 1. – S. 13–24.

5. Saifutdinov, R. Kh. Usloviia vozniknoveniia ferrezonansa napriazhenii v elektrooborudovanii / R. Kh. Saifutdinov // Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti : tr. II Vseros. nauch.-prakt. konf. – Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2018. – S. 388-394.
6. Adigamov, E. A. Ferrezonans v inertsiionnoi nelineinoi elektricheskoi tsepi / E. A. Adigamov, R. Kh. Saifutdinov // Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v KhKhI veke : trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii tvorcheskoi molodezhi s mezhdunarodnym uchastiem (Khabarovsk, 19–22 apreliia 2022 g.). V 2 t. T. 2 / pod red. A.R. Edigariana. – Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2022. – S. 47–50.
7. Gonchar, L. D. Programmno-apparatnyi generator nesinusoidalnykh signalov s moshchnym vykhodom / L. D. Gonchar, R. Kh. Saifutdinov // Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v KhKhI veke : trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii tvorcheskoi molodezhi s mezhdunarodnym uchastiem (Khabarovsk, 18–21 apreliia 2023 g.). V 2 t. T. 2 / pod red. I.V. Ignatenko. – Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2023. – S. 12–16.

Поступила в редакцию 01.04.2026 г., рекомендована к печати 16.04.2026 г.

SIMULATION OF FERRORESONANCE WITH CONSIDERATION OF INERTIAL PROPERTIES OF NONLINEAR INDUCTANCE

Saifutdinov R.KH.

The presence of nonlinear inductors in electrical devices can lead to ferroresonance of voltages in an electrical circuit with the occurrence of dangerous overvoltages and other undesirable consequences. The occurrence of ferroresonance significantly depends on the inertia of the nonlinear inductance. In a circuit with inertia-free inductance, ferroresonance is possible only with a certain form of current. In support of this, the results of a computer calculation and a physical experiment are presented. With sinusoidal current, ferroresonance is possible in a circuit with inertial inductance. A physical model of a ferroresonance circuit has been theoretically developed and tested.

Keywords: phase and energy criteria of ferroresonance, current form, inertial nonlinear inductance.

Сайфутдинов Ринат Хасанович

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры автоматизированных,
телекоммуникационных и электротехнических
систем ФГБОУ ВО «Дальневосточный
государственный университет путей сообщения»,
Российская Федерация, г. Хабаровск.
E-mail: SayfutdinovRH@mail.ru

Saifutdinov Rinat KHasanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Associate Professor at Department of
Automated, Telecommunication and Electrotechnical
Systems of Far Eastern State Transport University,
Russian Federation, Khabarovsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5804-0038>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АБСОРБЦИОННОГО РЕАКТОРА ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ ЕГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2026 Карпилов И.Д., Мустафин Р.М., Брагин Д.М., Попов А.И., Еремин А.В.

В работе исследовалась эффективность массообмена внутри двухфазного абсорбционного реактора. Массообмен внутри реактора исследовался путем численного моделирования в программе Ansys Fluent. В результате численного моделирования получены поля скоростей, давления и объемной доли фаз, а также определена площадь смоченной поверхности слоя. Полученные результаты позволили подобрать компоновку реактора с улучшенным контактом между жидкой и газовой фазами.

Ключевые слова: абсорбционный реактор, неподвижный слой, контакт фаз, гидродинамика, численное моделирование.

Введение. Современное развитие мировой энергетики происходит в условиях возрастающего внимания к проблемам изменения климата [1]. Одним из ключевых факторов, определяющих глобальное потепление, является увеличение выбросов диоксида углерода. В этих условиях особую актуальность приобретает переход к более экологически чистым энергетическим ресурсам, среди которых природный газ занимает важное промежуточное положение между традиционными углеводородами и возобновляемыми источниками энергии [2]. Однако добываемый природный газ в большинстве случаев содержит значительное количество примесей, среди которых следует отметить диоксид углерода. Очистка природного газа от диоксида углерода является важной технологической задачей, направленной как на повышение эффективности использования энергетических ресурсов, так и на снижение негативного воздействия на окружающую среду [3].

Для удаления CO_2 из природного газа в промышленности применяются различные методы. Наиболее распространенными из этих методов являются процессы абсорбции с использованием водных растворов аминов [4]. Абсорбционные процессы в колоннах с неподвижным слоем представляют особый интерес благодаря высокой эффективности массообмена. В таких аппаратах газовая и жидкая фазы движутся в противотоке, обеспечивая интенсивный контакт на поверхности насадки или частиц слоя. Неподвижный слой, сформированный из твердых частиц (например, сферической формы), играет ключевую роль в формировании развитой межфазной поверхности, на которой происходит перенос вещества. Эффективность работы абсорбционного реактора в значительной степени определяется гидродинамическими характеристиками течения фаз, включая распределение жидкой пленки, степень смачивания поверхности, наличие зон сухих участков, а также структуру газового потока [5].

Гидродинамика двухфазного течения в неподвижных слоях представляет собой сложную задачу, включающую взаимодействие между фазами, влияние геометрии слоя и режимов течения. В частности, распределение жидкости по слою определяет площадь

Финансовая поддержка осуществлена Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2025-0006) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета (создание новых молодёжных лабораторий).

межфазного контакта и, следовательно, интенсивность массообмена. Неравномерное смачивание приводит к снижению эффективности аппарата, поскольку часть поверхности остается неиспользованной [6]. Газовая фаза, в свою очередь, оказывает влияние на структуру жидкой пленки, вызывая ее перераспределение, разрыв и образование капель. Таким образом, гидродинамика напрямую связана с эксплуатационными характеристиками абсорбционного реактора [7].

В последние десятилетия значительное внимание уделяется экспериментальным и численным исследованиям гидродинамики в неподвижных слоях при двухфазном течении [8, 9]. Экспериментальные методы позволяют получать данные о распределении фаз, перепадах давления и степени смачивания, однако часто ограничены в пространственном и временном разрешении. В связи с этим широкое распространение получили методы вычислительной гидродинамики, позволяющие детально анализировать структуру потоков и межфазные взаимодействия [10].

Эффективность массообмена и контакта фаз при течении жидкости и газа через неподвижную вставку занимает важное место в современной литературе. В работе Гао и соавторов [11] проводилось CFD-моделирование двухфазного течения в неподвижной вставке с использованием расчетной схемы Volume of Fluid (VOF) для исследования гидродинамики процесса. Авторы показали, что распределение жидкой пленки по поверхности частиц носит существенно неравномерный характер, при этом формируются зоны частичного несмачивания. Также в результатах работы упоминается, что условия подачи фаз оказывают определяющее влияние на структуру потока и площадь межфазного контакта.

Отдельное направление исследований связано с учетом реальной геометрии слоя. В работе Патиля и соавторов [12] проведено экспериментальное и численное исследование течения через слой сферических частиц, расположенных структурированно. Показано, что структура потока на уровне пор неподвижной вставки характеризуется наличием локальных зон с увеличенной скоростью и зонами с неоднородной скоростью, которые не могут быть описаны в рамках моделей пористой среды. Полученные результаты демонстрируют важность учета микроструктуры слоя при анализе гидродинамики.

Влияние конфигурации входных патрубков на гидродинамические характеристики также активно изучается в современных работах. В частности, в исследованиях, посвящённых численному моделированию неподвижных слоев, показано, что распределение газа на входе определяет формирование каналов течения и степень смачивания поверхности. Например, в работе Лопеса и Ферерро [13] показано, что неравномерная подача газа приводит к образованию каналов, по которым движется основная часть газа, и снижению эффективности контакта фаз, тогда как более равномерное распределение газа способствует увеличению межфазной поверхности.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных гидродинамике двухфазных потоков в неподвижных слоях, ряд аспектов остается недостаточно изученным. В частности, влияние количества и расположения входных патрубков для газовой фазы на распределение потоков и площадь контакта фаз требует дополнительного анализа. Особенно актуальным является исследование таких эффектов в нестационарной постановке, позволяющей учитывать динамику формирования потоков и установления режима течения.

В настоящей работе проводится численное исследование гидродинамики двухфазного течения в абсорбционном реакторе с неподвижным слоем, состоящим из сферических частиц. Рассматривается противоточное движение жидкой и газовой фаз,

при котором жидкость подается в верхнюю часть реактора и движется вниз под действием силы тяжести, в то время как газ вводится в нижнюю часть и движется вверх. Особое внимание уделяется сравнению двух конфигураций подачи газа: с одним входным патрубком и с четырьмя входами, расположенными в нижней части аппарата.

Основная часть. Исследование гидродинамических характеристик внутри реактора с неподвижным слоем проводилось при помощи численного моделирования. Геометрическая модель исследуемого аппарата представляет собой вертикальный абсорбционный реактор колонного типа с неподвижным слоем насадки, сформированным из сферических частиц. Газовая фаза подается через нижний патрубок и движется вверх, тогда как жидкость вводится в верхней части реактора и стекает вниз под действием силы тяжести, реализуя противоточное течение фаз. Газовая фаза представляет собой смесь из 95% CH_4 и 5% CO_2 , а раствор представляет собой смесь из 25% $\text{C}_4\text{H}_{11}\text{NO}_2$ и 75% H_2O .

Высота насыпной вставки составляет 195 мм, а сама насадка выполнена в виде структурированного слоя из сферических частиц, что позволяет учитывать локальные гидродинамические эффекты, возникающие в пространстве между частицами. Частицы неподвижно закреплены внутри реактора. Наблюдаемое расстояние между частицами получилось исходя из выбранного продольного сечения неподвижной вставки. Такой подход обеспечивает более точное описание взаимодействия фаз по сравнению с моделями пористой среды.

Расчетная сетка построена с использованием неструктурированного подхода на основе треугольных элементов. В области между частицами применяется локальное сгущение сетки, что позволяет корректно разрешать градиенты скорости, давления и объемной доли фаз в узких каналах. Особое внимание уделено качеству сетки в зонах контакта фаз и вблизи поверхности частиц, где формируется жидкая пленка и происходит основной межфазный обмен.

На увеличенном фрагменте расчетной области видно, что сетка адаптирована к криволинейной геометрии между частицами. Это позволяет значительно сократить численные ошибки при моделировании гидродинамики на поверхности частицы, а также корректно вычислять изменение скорости в пристеночном слое.

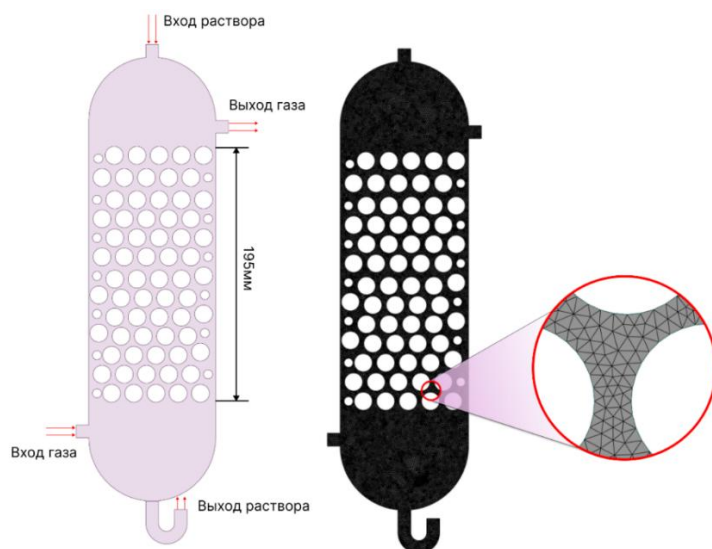


Рис. 1. Геометрия реактора с неподвижным слоем из сферических частиц и расчетная сетка из треугольных элементов

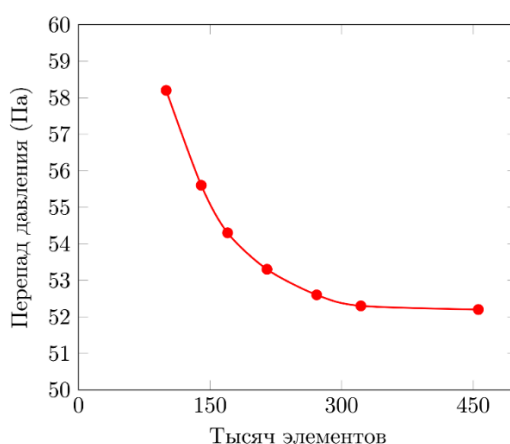


Рис. 2. График сеточной сходимости, сравнивающий потери давления при различной конфигурации сетки

Для оценки влияния различных конфигураций сетки из разного количества треугольных элементов на точность результатов было проведено исследование сеточной сходимости. В качестве контрольного параметра выбран перепад давления в реакторе, поскольку он является интегральной характеристикой гидродинамики и чувствителен к структуре потока.

Расчеты были выполнены для нескольких вариантов сетки с числом элементов от 99,8 до 452,3 тысяч. Полученные результаты показывают, что при увеличении числа элементов наблюдается монотонное снижение расчетного значения перепада давления. Это связано с более точным разрешением структуры потока при сгущении сетки.

На грубых сетках (порядка 100–150 тыс. элементов) перепад давления существенно завышен и составляет около 58 Па, что объясняется недостаточным размером элементов сетки в канале между частицами и переоценкой гидравлического сопротивления. При увеличении числа элементов до 200–300 тыс. наблюдается заметное снижение перепада давления и стабилизация результатов.

Начиная с сеток с количеством элементов в районе 300–350 тыс., изменение перепада давления становится незначительным (менее 1%), что свидетельствует об отсутствии зависимости результатов решения от размеров сетки. Для дальнейших расчетов была выбрана сетка с числом элементов в размере 322,6 тыс., обеспечивающая компромисс между точностью и вычислительными затратами. Таким образом, проведенное исследование подтверждает, что используемая расчетная сетка обеспечивает достаточную точность моделирования гидродинамики двухфазного течения в неподвижном слое и может быть использована для дальнейшего анализа.

Для численного решения необходимо задать систему уравнений, которые решаются в каждом узле расчетной сетки. Для численного описания гидродинамики двухфазного течения в абсорбционном реакторе использовался подход вычислительной гидродинамики, основанный на решении системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии для многофазной среды. Моделирование проводилось в нестационарной постановке с учетом взаимодействия газовой и жидкой фаз, а также сил поверхностного натяжения на границе раздела.

Движение фаз описывается уравнением неразрывности для каждой фазы:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{u}_k) = 0,$$

где ρ_k — плотность фазы k , кг/м³; u_k — вектор скорости фазы k , м/с; t — время, с.

Уравнение сохранения импульса для смеси имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho_m \overrightarrow{u_m})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \overrightarrow{u_m} \overrightarrow{u_m}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau_m + \rho_m g + F,$$

где ρ_m — плотность смеси, кг/м³; u_m — массово-усреднённая скорость, м/с; p — давление, Па; τ_m — тензор вязких напряжений, Па; g — ускорение свободного падения, м/с²; F — объемная сила, Н обусловленная межфазным взаимодействием:

$$\frac{\partial(E)}{\partial t} + \nabla \cdot (u_k (\rho_k E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + \Phi + Q_k,$$

где E — полная энергия, Дж; T — температура, К; k_{eff} — эффективная теплопроводность, Вт/(м·К); Φ — диссипация энергии за счет вязкости, 1/с; Q_k — объемные источники энергии, Вт.

Тензор напряжений τ_m вычисляется используя уравнение:

$$\tau_m = \mu \overrightarrow{u_m}^T + \mu \nabla \overrightarrow{u_m} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \overrightarrow{u_m} I,$$

где μ — динамическая вязкость, Па · с; I — единичный тензор.

Эффективная теплопроводность находится, исходя из выражения:

$$k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s,$$

Диссипация энергии за счет вязкости Φ рассчитывается по уравнению:

$$\Phi = \tau_m \cdot \overrightarrow{u_m},$$

Для отслеживания распределения фаз используется уравнение переноса объемной доли газовой фазы:

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \overrightarrow{u_g}) = 0,$$

где α_g — объемная доля газовой фазы. При этом выполняется условие:

$$\sum \alpha_g = 1.$$

Межфазное взаимодействие учитывается через силу поверхностного натяжения, определяемую методом непрерывной поверхностной силы:

$$F = \sigma k \nabla \alpha_g,$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, k — кривизна межфазной поверхности. Кривизна определяется выражением:

$$\sigma k = \sigma \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha_g}{|\nabla \alpha_g|} \right).$$

Прочие величины для расчета гидродинамики потока могут быть найдены в литературе [14]. Таким образом, представленная система уравнений позволяет учитывать динамику распределения фаз, межфазные силы и формирование границы раздела между газом и жидкостью.

Для замыкания математической модели на границах расчетной области задаются соответствующие граничные условия. На входе газовой фазы задается скорость газа в размере 0.5 м/с, а скорость жидкости в размере 0.04 м/с. Такое соотношение скоростей выбирается из соображений баланса между уносом жидкой фазы газом и силой гравитации, которая движет жидкость к нижней части реактора. На выходах фаз использовались граничные условия типа *pressure outlet*, позволяющие задавать давление на границе и обеспечивать естественный выход фаз из расчетной области. Для газовой фазы было задано давление –150 Па, а для жидкой фазы — –50 Па. Различие в значениях давления обусловлено необходимостью стабилизации численного расчета и корректного воспроизведения противоточного режима течения, при котором газовая фаза испытывает большее гидравлическое сопротивление при движении через слой. Нижняя часть реактора на начальный момент времени была целиком заполнена жидкостью. Это условие позволяет корректно задать начальные условия и ускорить выход решения на физически реалистичный режим, соответствующий начальной стадии заполнения аппарата жидкой фазой.

Численное решение системы уравнений осуществлялось с использованием схемы *Coupled*, обеспечивающей совместное решение уравнений давления и скорости, что особенно важно для задач с выраженным межфазным взаимодействием. Для повышения точности применялась пространственная аппроксимация второго порядка. Расчеты проводились в нестационарной постановке, что позволяет улучшить сходимость решения за счет постепенного выхода на стационарный или квазистационарный режим. Дополнительно использовалась настройка коэффициентов релаксации, обеспечивающая устойчивость хода численного решения. Для давления и объемной доли фаз коэффициенты были заданы равными 0.3, что позволяет стабилизировать границу раздела между фазами и препятствует излишней диффузии между средами. Для уравнений импульса и плотности использовались значения 0.75 для стабилизации распределения скорости газа внутри неподвижного слоя.

На рисунке 3 представлены контуры объемной доли фаз при времени процесса 6,5с для конфигурации реактора с одним входом для газовой смеси. На рисунке 3а показано распределение объемной доли жидкой фазы, а на рисунке 3б – газовой фазы. Из рисунка видно, что жидкость распределяется по слою неравномерно и формирует пленочное течение по поверхности частиц. В центральной части слоя наблюдаются зоны с повышенным содержанием жидкости, тогда как в некоторых областях формируются участки с пониженным смачиванием. Газовая фаза преимущественно движется по отдельным каналам, формируя канальное течение. Это свидетельствует о неравномерном распределении фаз и наличии зон движения газа с высокой скоростью.

Контуры распределения скорости и давления внутри реактора при времени процесса 6,5с для конфигурации с одним входом газа показаны на рис. 4. Поле скоростей (рис. 4а) показывает, что основная часть газа проходит вдоль правой стенки реактора. Такое распределение скорости вызвано меньшим сопротивлением потока вдоль стенки и наличием разряжения давления на выходном патрубке газа. Как следствие такое течение газа препятствует контакту газа с жидкостью и является неэффективным для процесса абсорбции. В остальной части неподвижного слоя скорость значительно ниже, что связано с гидравлическим сопротивлением

неподвижного слоя. Распределение давления (рис. 4б) показывает постепенное снижение давления по высоте реактора, что соответствует движению газа через слой частиц и потерям давления на преодоление сопротивления насадки. Наибольший градиент давления расположен в U-образной трубке. Что связано с гидростатическим давлением жидкости, которая препятствует проникновению газовой смеси.

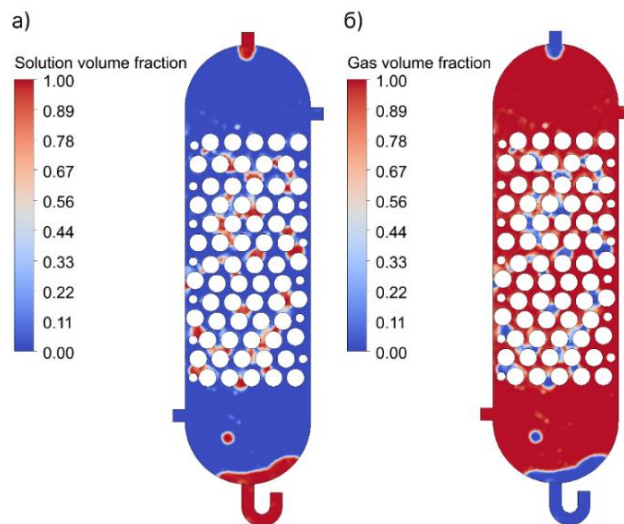


Рис. 3. Контуры объемной доли:

а) водного раствора; б) газовой смеси при длительности процесса 6,5с с одним входом газа

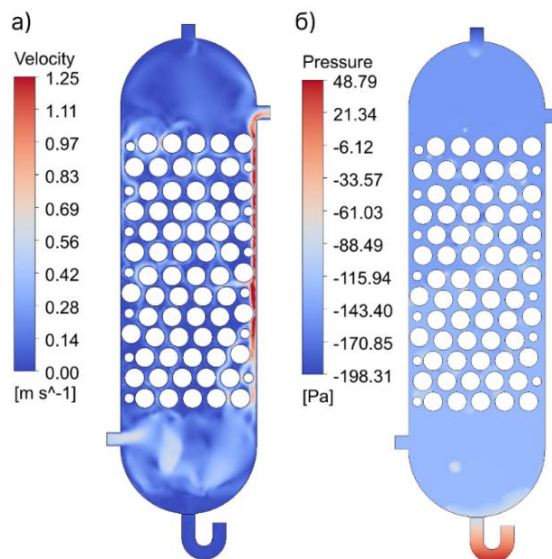


Рис. 4. Контуры распределения:

а) скорости; б) давления внутри реактора при длительности процесса 6,5с с одним входом газа

На рисунке 5 показаны контуры объемной доли жидкой и газовой фаз при времени процесса 6,5 с для конструкции реактора с четырьмя входными патрубками для газа. По сравнению с конфигурацией с одним входом наблюдается более равномерное распределение газа по сечению реактора. Жидкость также распределяется более равномерно, увеличивается площадь смоченной поверхности частиц. Зоны сухих участков становятся меньше, что свидетельствует об улучшении контакта фаз и потенциальном увеличении эффективности массообмена.

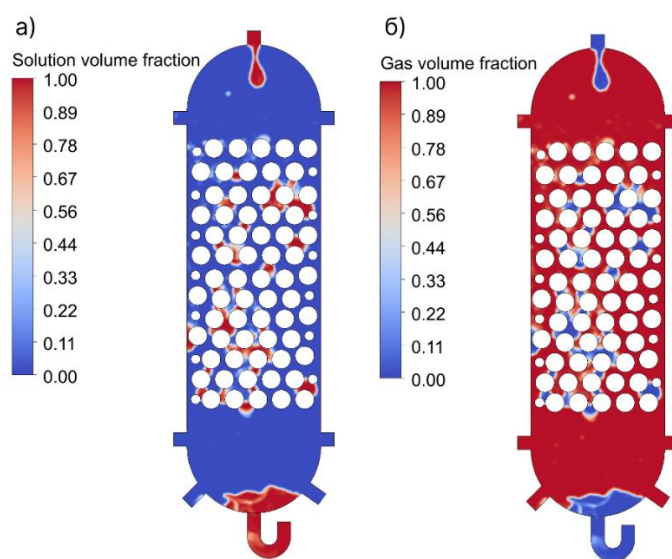


Рис. 5. Контуры объемной доли:

а) водного раствора; б) газовой смеси при длительности процесса 6,5с с четырьмя входами газа

Контуры распределения скорости и давления внутри реактора при использовании четырех входов газа представлены на рис. 6. Анализ поля скоростей на рис. 6а показывает более равномерное распределение скоростей по сечению слоя по сравнению с вариантом с одним входом. Данная конфигурация реактора улучшает контакт между фазами за счет постоянного образования нескольких каналов газовой фазы с повышенной скоростью, которые геометрически расположены заметно ближе к центру неподвижной вставки, где наблюдается наибольшая концентрация жидкой фазы. Такое наблюдение обосновано наличием двух источников разряжения и четырех входных патрубков из-за которых баланс разности давлений постоянно смещается и периодически создается разряжение в центральной области вставки. Распределение давления (рис. 6б) также становится более равномерным, а локальные перепады давления уменьшаются, что говорит о более равномерной гидродинамике внутри слоя.

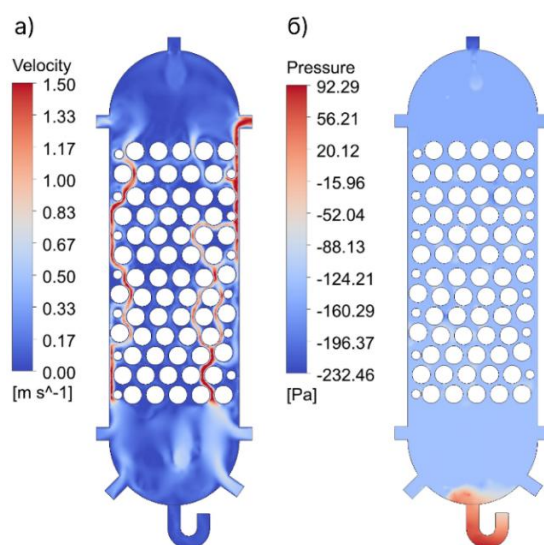


Рис. 6. Контуры распределения:

а) скорости; б) давления внутри реактора при длительности процесса 6,5с с четырьмя входами газа

На рисунке 7 представлен график зависимости площади смоченной поверхности от времени для реактора с одним входом газа и с четырьмя входами. Из графика видно, что с течением времени площадь смоченной поверхности увеличивается, поскольку жидкость постепенно распределяется по поверхности частиц. При использовании четырех входов газа площадь смоченной поверхности оказывается выше, чем при использовании одного входа. Это объясняется более равномерным распределением газа и жидкости по объему слоя, что способствует улучшению смачивания поверхности частиц.

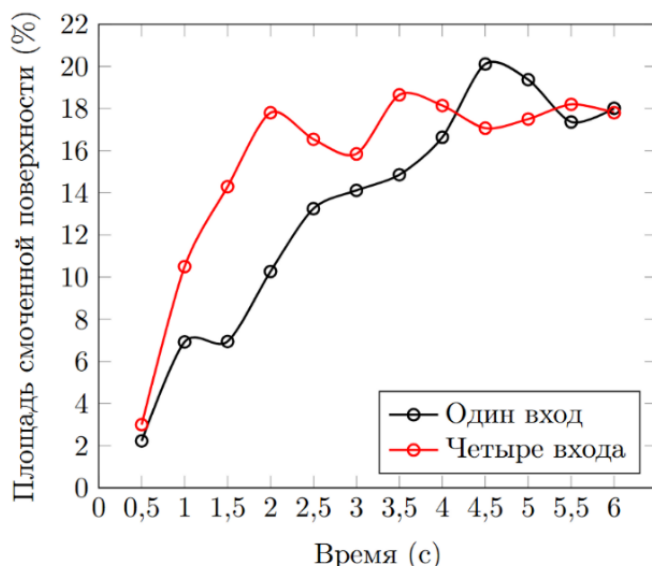


Рис. 7. График зависимости площади смоченной поверхности от времени течения процесса для реактора с одним входом и при наличии четырех входов

Для анализа изменения распределения газовой фазы внутри реактора в зависимости от времени были получены контуры распределения скорости внутри реактора с четырьмя входами газа при различной длительности процесса, изображенные на рис. 8.

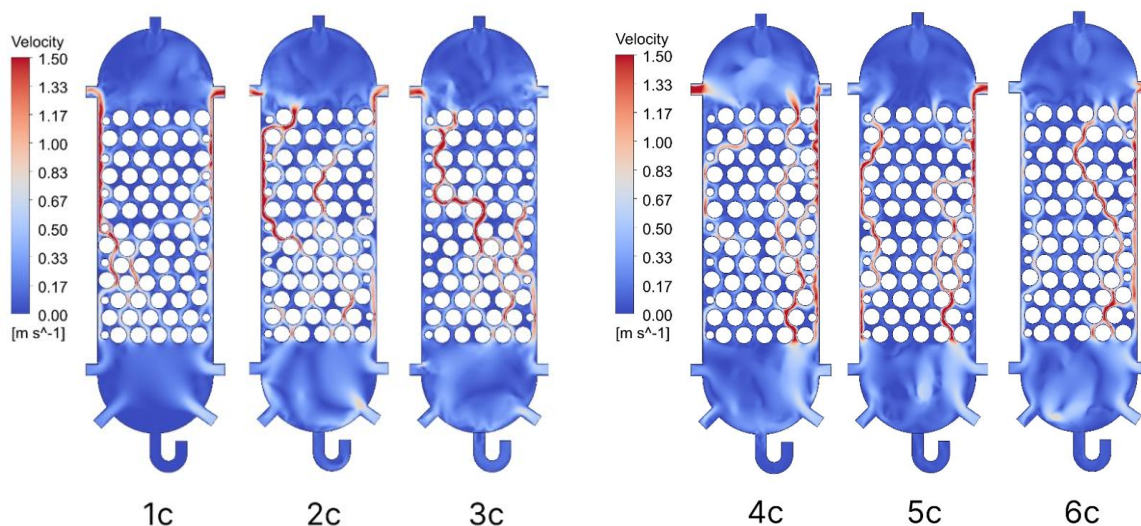


Рис. 8. Контуры распределения скорости потока внутри реактора с четырьмя входами газа при различной длительности процесса

На начальных этапах процесса наблюдается формирование потоков и перераспределение фаз внутри слоя. С течением времени максимальная скорость потока газа становится ниже, что свидетельствует о его более равномерном распределении по поверхности неподвижной вставки. Также из контуров видно, что основной поток газа не стабильный, а меняется, тем самым соприкасаясь со временем со всеми частицами неподвижной вставки. Такое наблюдение позволяет заявить о гораздо лучшем контакте жидкой и газовой фаз, чем при стандартной конфигурации реактора с одним входом.

Выводы. Проведено сравнение двух конфигураций подачи газа в абсорбционном реакторе — с одним входным патрубком и с четырьмя входами. Установлено, что при использовании одного входа газа формируются каналы течения, по которым проходит основная часть газовой фазы, что приводит к неравномерному распределению жидкости и снижению площади смоченной поверхности. При использовании четырех входов газа распределение фаз становится более равномерным, увеличивая площадь межфазного контакта.

Полученные результаты показывают, что конфигурация подачи газовой фазы оказывает существенное влияние на гидродинамику двухфазного течения в неподвижном слое. Более равномерное распределение газа способствует увеличению площади смоченной поверхности и улучшению контакта фаз, что приводит к повышению эффективности массообмена в абсорбционном реакторе.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании реакторов с неподвижным слоем и оптимизации конструкции входных устройств для повышения эффективности процессов абсорбции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures / K. Abbass [et al.] // *Environmental science and pollution research*. – 2022. – V. 29. – №. 28. – P. 42539-42559.
2. Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility / O. Massarweh [et al.] // *Journal of CO2 Utilization*. – 2023. – V. 70. – P. 102438.
3. Insights on cryogenic distillation technology for simultaneous CO2 and H2S removal for sour gas fields / H. T. N. Tengku [et al.] // *Molecules*. – 2022. – V. 27. – №. 4. – P. 1424.
4. Review on CO2 capture by blended amine solutions / B. Aghel [et al.] // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2022. – V. 119. – P. 103715.
5. Shareefdeen, Z. Recent developments on the performance of algal bioreactors for CO2 removal: focusing on the light intensity and photoperiods / Z. Shareefdeen, A. Elkamel, Z. B. Babar // *BioTech*. – 2023. – V. 12. – №. 1. – P. 10.
6. Recent advancements on hydrodynamics and mass transfer characteristics for CO2 absorption in microreactors / M. Pasha [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2022. – V. 61. – №. 34. – P. 12249-12268.
7. An amine-functionalized strategy to enhance the CO2 absorption of type III porous liquids / X. Zhao [et al.] // *Energy*. – 2023. – V. 279. – P. 127975.
8. Computational screening methodology identifies effective solvents for CO2 capture / A. A. Orlov [et al.] // *Communications Chemistry*. – 2022. – V. 5. – №. 1. – P. 37.
9. Analyzing the potential benefits of trio-amine systems for enhancing the CO2 desorption processes / X. Hu [et al.] // *Fuel*. – 2022. – V. 316. – P. 123216.
10. Jamali, M. A review on computational fluid dynamics simulations of industrial amine absorber columns for CO2 capture / M. Jamali, A. Azari // *ChemBioEng Reviews*. – 2023. – V. 10. – №. 1. – P. 6-21.
11. Pressure relief by blasting roof cutting in close seam group mining under thick sandstone to enhance gas extraction for mining safety / K. Gao [et al.] // *Processes*. – 2021. – V. 9. – №. 4. – P. 603.
12. Experimental and numerical investigation to elucidate the fluid flow through packed beds with structured particle packings / S. Patil [et al.] // *Particuology*. – 2024. – V. 89. – P. 218-237.

13. CFD modelling of multiphase flow distribution in trickle beds / R. J. G. Lopes, R. M. Quinta-Ferreira // Chemical Engineering Journal. – 2009. – V. 147. – №. 2-3. – P. 342-355.
14. Karpilov, I. Effect of catalyst particle shape on heat and mass transfer in steam methane reforming / I. Karpilov, D. Pashchenko // Case Studies in Thermal Engineering. – 2025. – V. 72. – P. 106343.

REFERENCES LIST

1. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures / K. Abbass [et al.] // Environmental science and pollution research. – 2022. – V. 29. – №. 28. – P. 42539-42559.
2. Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility / O. Massarweh [et al.] // Journal of CO2 Utilization. – 2023. – V. 70. – P. 102438.
3. Insights on cryogenic distillation technology for simultaneous CO2 and H2S removal for sour gas fields / H. T. N. Tengku [et al.] // Molecules. – 2022. – V. 27. – №. 4. – P. 1424.
4. Review on CO2 capture by blended amine solutions / B. Aghel [et al.] // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2022. – V. 119. – P. 103715.
5. Shareefdeen, Z. Recent developments on the performance of algal bioreactors for CO2 removal: focusing on the light intensity and photoperiods / Z. Shareefdeen, A. Elkamel, Z. B. Babar // BioTech. – 2023. – V. 12. – №. 1. – P. 10.
6. Recent advancements on hydrodynamics and mass transfer characteristics for CO2 absorption in microreactors / M. Pasha [et al.] // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2022. – V. 61. – №. 34. – P. 12249-12268.
7. An amine-functionalized strategy to enhance the CO2 absorption of type III porous liquids / X. Zhao [et al.] // Energy. – 2023. – V. 279. – P. 127975.
8. Computational screening methodology identifies effective solvents for CO2 capture / A. A. Orlov [et al.] // Communications Chemistry. – 2022. – V. 5. – №. 1. – P. 37.
9. Analyzing the potential benefits of trio-amine systems for enhancing the CO2 desorption processes / X. Hu [et al.] // Fuel. – 2022. – V. 316. – P. 123216.
10. Jamali, M. A review on computational fluid dynamics simulations of industrial amine absorber columns for CO2 capture / M. Jamali, A. Azari // ChemBioEng Reviews. – 2023. – V. 10. – №. 1. – P. 6-21.
11. Pressure relief by blasting roof cutting in close seam group mining under thick sandstone to enhance gas extraction for mining safety / K. Gao [et al.] // Processes. – 2021. – V. 9. – №. 4. – P. 603.
12. Experimental and numerical investigation to elucidate the fluid flow through packed beds with structured particle packings / S. Patil [et al.] // Particuology. – 2024. – V. 89. – P. 218-237.
13. CFD modelling of multiphase flow distribution in trickle beds / R. J. G. Lopes, R. M. Quinta-Ferreira // Chemical Engineering Journal. – 2009. – V. 147. – №. 2-3. – P. 342-355.
14. Karpilov, I. Effect of catalyst particle shape on heat and mass transfer in steam methane reforming / I. Karpilov, D. Pashchenko // Case Studies in Thermal Engineering. – 2025. – V. 72. – P. 106343.

Поступила в редакцию 02.04.2026 г., рекомендована к печати 17.04.2026 г.

INCREASING THE EFFICIENCY OF AN ABSORPTION REACTOR BY IMPROVING ITS
HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS

Karpilov I.D., Mustafin R.M., Bragin D.M., Popov A.I., Eremin A.V.

This study investigated the efficiency of mass transfer within a two-phase absorption reactor. Mass transfer within the reactor was investigated using numerical simulations in Ansys Fluent. The numerical simulations yielded velocity, pressure, and phase volume fraction fields, as well as the wetted surface area of the bed. These results enabled the selection of a reactor layout with improved contact between the liquid and gas phases.

Keywords: absorption reactor, fixed bed, phase contact, hydrodynamics, numerical simulation.

Карпилов Игорь Дмитриевич

младший научный сотрудник кафедры
промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический
университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: igorkarpilov@mail.ru

Karpilov Igor Dmitrievich

Junior Researcher at Department of Industrial
Thermal Power Engineering of Samara State
Technical University,
Russian Federation, Samara.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6604-6026>

Мустафин Равиль Мансурович

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический
университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: ravil-bk211@mail.ru

Mustafin Ravil Mansurovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
at Department of Industrial Thermal Power
Engineering of Samara State Technical University,
Russian Federation, Samara.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3784-2829>

Брагин Дмитрий Михайлович

младший научный сотрудник кафедры
промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический
университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: dimabragin2204@yandex.ru

Bragin Dmitrii Mikhailovich

Junior Research Fellow at Department of Industrial
Thermal Power Engineering of Samara State
Technical University,
Russian Federation, Samara.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>

Попов Андрей Игоревич

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический
университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: andreipopov@mail.ru

Popov Andrei Igorevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
at Department of Industrial Thermal Power
Engineering of Samara State Technical University,
Russian Federation, Samara.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5014-8167>

Еремин Антон Владимирович

доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой промышленной теплоэнергетики
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: a.v.eremin@list.ru

Eremin Anton Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Industrial Thermal Power
Engineering Department of Samara State Technical
University,
Russian Federation, Samara.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2614-6329>

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.

2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более одной статьи от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень, соавторами не могут быть студенты и магистранты.

3. Авторами на адрес электронной почты редакции vestnik.g@mail.ru высылается электронный вариант полного текста статьи (на русском или английском языке) в формате docx. Рекомендуемый объем статьи от 7 до 17 страниц, включая рисунки, таблицы, списки источников, сведения об авторах. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.

4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.

5. Обязательные требования к оформлению статей:

- **Размер бумаги:** А4.
- **Ориентация:** книжная.
- **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
- **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
- **Междустрочный интервал:** одинарный.
- **Основной текст статьи:** абзацный отступ 1 см, шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Аннотация, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Подписуемые подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** резервируется для размещения идентификаторов EDN и DOI.
- **Вторая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.

- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, далее **фамилия(и) и инициалы автора(ов)** – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание **Ключевые слова:** – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на каждый источник в тексте статьи приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5–10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** словосочетание **REFERENCES LIST** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см дублируется нумерованный список источников, в котором англоязычные источники приводятся на языке оригинала, а остальные источники приводятся посредством транслитерации кириллических знаков.
- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию хх.хх.20хх г., рекомендована к изданию хх.хх.20хх г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, **фамилия(и) и инициалы автора(ов)**, аннотация и ключевые слова (**Keywords**) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
 - **Фамилия, имя, отчество;**
 - ученая степень, ученое звание, должность (с указанием организации);
 - страна, город;
 - адрес электронной почты;
 - идентификатор ORCID.

7. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке - рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей.

8. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются посредством редактора формул MathType с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

9. Образец оформления статьи (в т.ч. рисунков, таблиц, формул и источников):

EDN OAXXSW

DOI 10.5281/zenodo.15586055

УДК 681.5:621.37:004.056

КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОКАНАЛОВ ПЭМИН

© 2026 *Третьяков И.А., Данилов В.В.*

В настоящей работе представлены и рассмотрены основные компоненты – функциональные блоки разрабатываемой АСНИ радиоканалов, их функциональные особенности, а также взаимодействие между ними для обеспечения комплексного подхода к исследованию радиоканалов. Предложены функциональные блоки детектирования электромагнитных излучений и наводок.

Ключевые слова: АСНИ, ПЭМИН, радиоканалы, детектирование, обнаружение, подавление.

Введение. Современные научные исследования в области радиоканалов побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) становятся все более актуальными в контексте развития технологий связи и управления [1-3]. С ростом числа беспроводных устройств и расширением спектра их применения возникает необходимость в создании эффективно функционирующих автоматизированных систем, способных обеспечить высокую степень надежности и точности в сборе, анализе и интерпретации данных.

Детектирование электромагнитных излучений и наводок. Анализ технической литературы по различным типам детекторов позволил выбрать соответствующую схему, с перспективой её дальнейшего усовершенствования [3-6].

На рисунке 1 представлена усовершенствованная принципиальная схема модернизированного детектора.

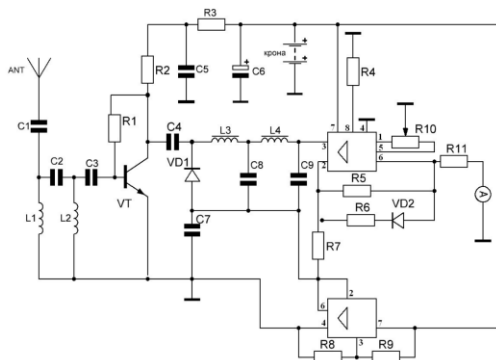
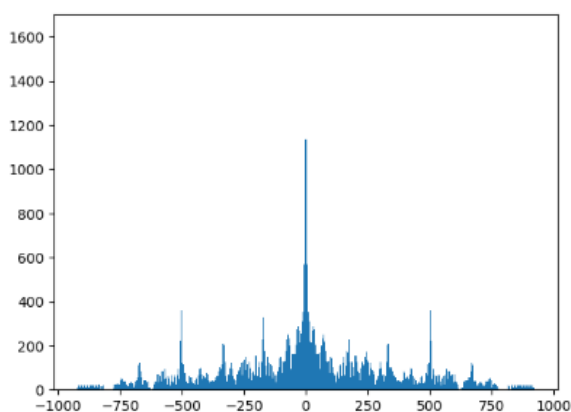


Рис. 1. Функциональный блок детектирования

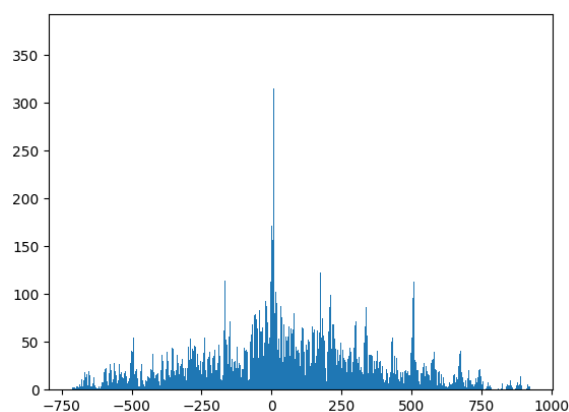
Оценка ШИМ-сигнала. В таблице 1 приведен набор спектральных составляющих для ШИМ-сигнала на частоте 4,3 кГц. На рисунке 2 показаны диаграммы совпадения, которые являются относительным индикатором качества мероприятий по подавлению.

Таблица 1. Спектральные составляющие ШИМ сигнала

Номер гармоники	Частота, кГц	Амплитуда, dBV
1	4.394	-4.033
2	8.789	-5.854
3	12.69	-7.724
4	17.08	-9.89
5	20.99	-14.38
6	41.99	-17.05



а) без влияния мешающего сигнала



б) с мешающим сигналом на частоте ПЭМИН

Рис. 2. Диаграммы совпадения

Амплитуда n -ой гармоники описывается выражением:

$$A_n = \frac{A}{n\pi} |\sin(n\pi D)|, \quad (1)$$

где: A – амплитуда ШИМ-сигнала; n – номер гармоники; D – коэффициент заполнения.

Выводы. Таким образом, в работе рассмотрены основные компоненты – функциональные блоки разрабатываемой автоматизированной системы научных исследований радиоканалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированные системы научных исследований [Электронный ресурс]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (дата обращения 22.12.2025).
2. Методика оценки побочных электромагнитных излучений и наводок / Я. И. Рушечников, В. В. Данилов, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 126-134. – DOI 10.5281/zenodo.14018656. – EDN DLEMAM.
3. Рушечников, Я. И. Адаптивная автоматизированная система подавления побочных электромагнитных излучений и наводок / Я. И. Рушечников, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 4(39). – С. 150-161. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-150-161. – EDN COPMJH.
4. Wong, K. L. Compact and Broadband Microstrip Antennas / K. L. Wong. – NY: John Wiley&Sons, 2002. – 324 p.
5. Панченко, Б. А. Микрополосковые антенны / Б. А. Панченко, Е. И. Неведов. – М.: Радио, 1986. – 145 с.
6. Kuhn, M. G. Soft tempest: Hidden data transmission using electromagnetic emanations / M. G. Kuhn, R. J. Anderson // International Workshop on Information Hiding. – Berlin: Springer, 1998. – P. 124-142.

REFERENCES LIST

1. Avtomatizirovannye sistemy nauchnykh issledovaniy [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (data obrashcheniia 22.12.2025).
2. Metodika otsenki pobochnykh elektromagnitnykh izluchenii i navodok / Ia. I. Rushechnikov, V. V. Danilov, I. A. Tretiakov [i dr.] // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Serii G: Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 3. – S. 126-134. – DOI 10.5281/zenodo.14018656. – EDN DLEMAM.
3. Rushechnikov, Ia. I. Adaptivnaia avtomatizirovannaia sistema podavleniia pobochnykh elektromagnitnykh izluchenii i navodok / Ia. I. Rushechnikov, I. A. Tretiakov, V. V. Danilov // Problemy iskusstvennogo intellekta. – 2025. – № 4(39). – S. 150-161. – DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-150-161. – EDN COPMJH.
4. Wong, K. L. Compact and Broadband Microstrip Antennas / K. L. Wong. – NY: John Wiley&Sons, 2002. – 324 p.
5. Panchenko, B. A. Mikropoloskovye anteny / B. A. Panchenko, E. I. Nefedov. – M.: Radio, 1986. – 145 s.
6. Kuhn, M. G. Soft tempest: Hidden data transmission using electromagnetic emanations / M. G. Kuhn, R. J. Anderson // International Workshop on Information Hiding. – Berlin: Springer, 1998. – P. 124-142.

Поступила в редакцию xx.xx.2026 г., рекомендована к изданию xx.xx.2026 г.

COMPONENTS OF THE AUTOMATED SYSTEM OF SCIENTIFIC RESEARCH OF RADIO CHANNELS TEMPEST

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

In this paper, the main components are considered – the functional blocks of the developed ASRS of radio channels, their functional features, as well as the interaction between them. To provide an integrated approach to the study of radio channels, functional blocks for detecting electromagnetic radiation and leads.

Keywords: ASRS, TEMPEST, radio channels, detection, detection, suppression.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7816-1563>

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8974-7268>

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2026. – № 2.

Научное и техническое редактирование: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

Адрес редакции:

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://dongu-vestnik04.ru>

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано к изданию 05.06.2026 г.

Адрес издателя: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
125009, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Тверской, ул. Тверская, д. 11, стр. 1.

Издательство ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.