

**АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ
«ACADEMY OF NATURAL HISTORY»**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**INTERNATIONAL
JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL
RESEARCH**

Журнал основан в 2007 году
The journal is based in 2007
ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,593

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,299

№ 7 2025

Научный журнал
Scientific journal

Журнал International Journal of Applied and Fundamental Research (Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований) зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-60735.

Электронная версия размещается на сайте www.rae.ru

The electronic version takes places on a site www.rae.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

к.м.н. Н.Ю. Стукова

Ответственный секретарь

к.м.н. М.Н. Бизенкова

EDITOR

Natalia Stukova

Senior Director and Publisher

Maria Bizenkova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.б.н., проф. Абдуллаев А. (Душанбе); к.б.н. Алиева К.Г. (Махачкала); д.х.н., к.ф.-м.н., проф. Алоев В.З. (Чегем-2); д.б.н., проф. Андреева А.В. (Уфа); к.географ.н., доцент Аничкина Н.В. (Липецк); к.ф.-м.н. Барановский Н.В. (Томск); д.б.н., доцент Белых О.А. (Иркутск); д.т.н., проф. Бурмистрова О.Н. (Ухта); д.т.н., доцент Быстров В.А. (Новокузнецк); д.м.н., проф. Гарбуз И.Ф. (Тирасполь); д.ф.-м.н., проф. Геворкян Э.А. (Москва); д.х.н., проф. Гурбанов Г.Р. (Баку); д.ветеринар.н., доцент Ермолина С.А. (Киров); к.т.н. Есенаманова М.С. (Атырау); к.ф.-м.н., д.п.н., проф. Ефремова Н.Ф. (Ростов-на-Дону); д.м.н. Жураковский И.П. (Новосибирск); д.т.н., доцент Ибраев И.К. (Темиртау); к.т.н., доцент Исмаилов З.И. (Баку); д.б.н., с.н.с. Кавцевич Н.Н. (Североморск); д.т.н., проф. Калмыков И.А. (Ставрополь); д.б.н. Кокорева И.И. (Алматы); д.г.-м.н., доцент Копылов И.С. (Пермь); к.б.н., доцент Коротченко И.С. (Красноярск); к.с.-х.н., доцент Кряжева В.Л. (Нижний Новгород); д.ф.-м.н., доцент Кульков В.Г. (Волжский); д.б.н. Ларионов М.В. (Балашов); д.б.н., к.с.-х.н., доцент Леонтьев Д.Ф. (Иркутск); д.географ.н., к.б.н., проф. Луговской А.М. (Москва); д.г.-м.н., с.н.с. Мельников А.И. (Иркутск); д.т.н., проф. Несветаев Г.В. (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н. Никитин С.Н. (п. Тимирязевский); д.фарм.н., доцент Олешко О.А. (Пермь); д.с.-х.н., с.н.с., проф. Партоев К. (Душанбе); к.п.н., доцент Попова И.Н. (Москва); д.т.н., проф. Рогачев А.Ф. (Волгоград); д.м.н., с.н.с., доцент Розыходжаева Г.А. (Ташкент); д.г.-м.н. Сакиев К.С. (Бишкек); д.т.н., проф. Сугак Е.В. (Красноярск); д.ветеринар.н., проф. Трефилов Б.Б. (Санкт-Петербург); к.т.н., доцент Хайдаров А.Г. (Санкт-Петербург); д.м.н., проф. Чарышкин А.Л. (Ульяновск); д.географ.н., проф. Чодураев Т.М. (Бишкек); д.б.н., проф. Шалпыков К.Т. (Бишкек); к.х.н. Шарифуллина Л.Р. (Москва); д.п.н., проф. Щирин Д.В. (Санкт-Петербург)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL RESEARCH

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals directory» в целях информирования мировой научной общественности.

Журнал представлен в ведущих библиотеках страны и является рецензируемым.

Журнал представлен в НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (НЭБ) –
головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и имеет импакт-фактор Российского индекса научного цитирования (ИФ РИНЦ).

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,593.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,299.

Учредитель, издатель и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47
Адрес редакции и издателя: 410056, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56

ISSN 1996-3955

Тел. редакции – 8-(499)-705-72-30

E-mail: edition@rae.ru

Зав. редакцией Т.В. Шнуровозова
Техническое редактирование и верстка Е.Н. Доронкина
Корректор Е.С. Галенкина, Н.А. Дудкина

Подписано в печать – 30.07.2025
Дата выхода номера – 29.08.2025

Формат 60x90 1/8
Типография
ООО НИЦ «Академия Естествознания»
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Распространяется по свободной цене

Усл. печ. л. 4,75
Тираж 500 экз.
Заказ МЖПиФИ 2025/7

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

БИОИМПЕДАНСНЫЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА
НА УМЕРЕННОЕ ГИПОКСИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Шушков С.В. 5

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ОБЩИЕ ПАТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ
НЕЙРОТОКСИЧНОСТИ

Иванов М.Б. 13

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТИ
ПУНКТОВ ВЕСОГАБАРИТНОГО КОНТРОЛЯ

Белехов А.А., Тагильцев С.Р., Никуленков Д.В., Тумашевич Д.Г. 20

ПРАВОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛНЕНИЯ
НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫХ АКТОВ В ОБЛАСТИ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Голов Е.В., Черкашин С.Н., Петров С.В. 25

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

РАЗЛОЖЕНИЕ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА В ПРИСУТСТВИИ
СЕРЕБРЯНОГО КАТАЛИЗАТОРА

Камбарова Г.Б., Ли С.П., Худайбергенова Э.М., Жоробекова Ш.Ж. 31

CONTENTS

BIOLOGICAL SCIENCES

ARTICLES

BIOIMPEDANCE ANALYSIS OF THE BODY'S REACTION
FOR MODERATE HYPOXIC EFFECTS

Shushkov S.V. 5

MEDICAL SCIENCES

REVIEW

GENERAL PATHOGENETIC MECHANISMS OF NEUROTOXICITY

Ivanov M.B. 13

TECHNICAL SCIENCES

ARTICLES

COMPREHENSIVE PLANNING SYSTEM FOR A NETWORK
OF WEIGHT AND SIZE CONTROL POINTS

Belekhov A.A., Tagiltsev S.R., Nikulenkov D.V., Tumashevich D.G. 20

LEGAL FEATURES OF THE EXECUTION OF REGULATORY
LEGAL ACTS IN THE FIELD OF TRANSPORT SAFETY

Golov E.V., Cherkashin S.N., Petrov S.V. 25

CHEMICAL SCIENCES

ARTICLE

DECOMPOSITION OF HYDROGEN PEROXIDE
IN THE PRESENCE OF A SILVER CATALYST

Kambarova G.B., Li S.P., Khudaybergenova E.M., Zhorobekova Sh.Zh. 31

СТАТЬЯ

УДК 577.31

**БИОИМПЕДАНСНЫЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА
НА УМЕРЕННОЕ ГИПОКСИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ****Шушков С.В.***Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, e-mail: shushkov_s_v@mail.ru*

Дыхание при пониженной концентрации кислорода сопровождается активной адаптацией организма к гипоксии. Разнообразие протекающих при этом физиологических процессов требует получения возможно большего количества информации. Для контроля состояния предлагается использовать биоимпедансный анализ, позволяющий измерить с высокой точностью угол сдвига фазы между зондирующими сигналами тока и напряжения. Результат позволяет оценить состояние клеточных мембран, в частности концентрацию ионов. Целью исследования было изучение процесса адаптации к гипоксии во времени. В разработанной установке биоимпедансные измерения проводились по трехточечной схеме, когда на стопу правой ноги накладываются пара электродов, включенных в цепь генератора и в измерительный контур, и на запястье правой руки устанавливается электрод, подключенный одновременно к обоим контурам. Наблюдения в течение двух лет для относительно здорового человека показали сезонные колебания значений фазового угла. Можно полагать, что данный эффект определяется уровнем физической активности человека и питания. В ходе исследований гипоксического воздействия применялась палатка с воздухом при пониженной концентрации кислорода. После проведения гипоксических процедур обнаружено появление колебаний в организме для величины фазового угла, наблюдаемое на протяжении нескольких дней. После часовой процедуры при сниженной до 18% концентрации кислорода амплитуда колебаний могла превышать исходный уровень в полтора раза. После сна в палатке в течение 6 ч происходили колебания фазового угла с двукратным нарастанием по амплитуде. Обнаруженный эффект возникновения колебаний в организме как термодинамически неравновесной системе демонстрирует, что адаптация к гипоксии сопровождается формированием новых биоструктур, поддерживая процесс самоорганизации в лечебно-оздоровительном направлении.

Ключевые слова: умеренное потребление кислорода, адаптация к гипоксии, гипоксическая палатка, биоимпедансный анализ, колебания величины фазового угла

**BIOIMPEDANCE ANALYSIS OF THE BODY'S REACTION
FOR MODERATE HYPOXIC EFFECTS****Shushkov S.V.***Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, e-mail: shushkov_s_v@mail.ru*

Breathing at a low concentration of oxygen is accompanied by an active adaptation of the body to hypoxia. The variety of physiological processes involved requires obtaining as much information as possible. To monitor the condition, it is proposed to use bioimpedance analysis, which makes it possible to measure with high accuracy the phase shift angle between current and voltage probing signals. The result makes it possible to assess the state of cell membranes, in particular, the concentration of ions. The aim of the study was to study the process of adaptation to hypoxia over time. In the developed installation, bioimpedance measurements were carried out according to a 3-point scheme, when a pair of electrodes connected to the generator circuit and measuring circuit are applied to the foot of the right foot, and an electrode connected to both circuits is installed on the wrist of the right hand. Observations over two years for a relatively healthy person showed seasonal fluctuations in the values of the phase angle. It can be assumed that this effect is determined by a person's level of physical activity and nutrition. In the course of studies of hypoxic effects, a tent with air at a reduced concentration of oxygen was used. After carrying out hypoxic procedures, the appearance of fluctuations in the body for the magnitude of the phase angle was observed for several days. After an hour-long procedure, with the oxygen concentration reduced to 18%, the oscillation amplitude could exceed the initial level by one and a half times. After sleeping in the tent for 6 hours, the phase angle fluctuated with a twofold increase in amplitude. The discovered effect of fluctuations in the body as a thermodynamically non-equilibrium system demonstrates that adaptation to hypoxia is accompanied by the formation of new biostructures, supporting the process of self-organization in the therapeutic and health-improving direction.

Keywords: moderate oxygen consumption, adaptation to hypoxia, hypoxic tent, bioimpedance analysis, fluctuations in the magnitude of the phase angle

Введение

Среди методов, сопровождающих лечение по медицинскому протоколу и в целом способствующих оздоровлению, положительно зарекомендовало себя дыхание воздухом с пониженной концентрацией кислорода ввиду активной физиологической

адаптации организма к гипоксии [1]. Умеренное гипоксическое воздействие обладает значительным восстановительным потенциалом для организма человека, способствующим здоровью и продолжительности жизни [2]. В лечебной и санаторной практике активно применяются в различных вари-

антах установки для дыхательной терапии «Био-Нова», Reoxu и др. Гипоксическое воздействие осуществляется, как правило, путем дыхания в маске. Широко применяемая процедура «интервальная нормобарическая гипокситерапия» проводится, например, циклами по 5 мин, чередуя пониженное до 9% содержание кислорода и обычный воздух (21% O₂) [3]. Для улучшения спортивных результатов применяют физические упражнения и сон в дыхательной атмосфере «горный воздух», создаваемой в «гипоксической» палатке путем снижения концентрации кислорода [4]. Для целей общего оздоровления также применяются различные дыхательные тренажеры типа «Самоздрав», «ГУИ», а также безаппаратные методики К.П. Бутейко, А.Н. Стрельниковой и пр. [5].

Среди прочих методов оценки состояния организма информативным в биофизическом аспекте является биоимпедансный анализ (БИА) [6, 7]. В этом случае на тело человека накладываются несколько электродов, например, по паре на руку и на ногу, подается зондирующий сигнал синусоидальной формы повышенной частоты (как правило, 50 кГц) напряжением несколько вольт, и измеряются характеристики проводимости биологических тканей, активное сопротивление R и угол сдвига фазы φ одного сигнала относительно другого. Из соотношения $\operatorname{tg} \varphi = 1/(\omega CR)$, где ω – частота сигнала, можно оценить электрическую емкость биологического объекта C, которая отражает эволюцию заряда на клеточных мембранах. Так, уменьшение φ соответствует росту электрической емкости C, увеличению числа заряженных частиц и большей эквивалентной площади, занимаемой ими. В обратном процессе стекание зарядов приводит, как правило, к увеличению проводимости крови и лимфы и может контролироваться по снижению величины сопротивления R.

В настоящее время для проведения БИА применяются аппараты «Медасс», «Велнесс» (РФ), различные зарубежные [8]. В случае медицинских исследований, имеющих особенности, применяют приборы специализированной разработки, например с установкой электродов в локализованной зоне и при генерации зондирующего сигнала на нескольких частотах [9]. Нужно отметить, что единовременное биоимпедансное измерение чувствительно к режиму предшествующего сна, приема пищи, физической нагрузки и других факторов, поэтому процедуру измерения стараются проводить в одинаковых условиях, например утром натощак.

Практика применения «Медасс» показывает, что фазовый сдвиг 4,40 соответствует ослабленному организму, в том числе

при устойчивой гиподинамией, 5,50 характерно для нормального состояния организма, 7,80 отвечает физически развитому здоровому человеку. Низкие значения фазового угла наблюдаются у больных онкологическими заболеваниями, при гепатитах, СПИДе и многих прочих долговременных проблемах и ассоциированы с осложнениями в «период дожития» [10, с. 12]. Из статистики анализов «Велнесс» следует, что большее значение фазового угла свидетельствует о хорошем состоянии мембран клеток и высокой активности мышц. С возрастом, при недостатке питательных веществ или хронических болезнях, величина этого параметра снижается. Коридор нормы соответствует 5,50–8,0. Значительное снижение бывает при обширном распаде тканей, например при циррозе печени или туберкулезе. У больных людей, особенно с хроническими заболеваниями, чем ниже значения, тем хуже прогноз лечения [11, с. 26].

Разнообразие физиологических процессов, протекающих в организме в условиях умеренного потребления кислорода, требует для правильного выбора лечебных процедур получения возможно большего количества информации. в том числе биофизического характера.

Цель исследования – для установления взаимосвязи между условиями гипоксического воздействия и откликом на них организма изучить чувствительным физическим методом биоимпедансного анализа кратковременные и долговременные биофизические эффекты адаптации к гипоксии.

Материалы и методы исследования

В разработанной установке специализированный модуль БИА-измерений имел три электрода (вместо традиционных четырех), что связано с особенностями генератора, совмещенного с цифровым осциллографом HANTEK 2D72. Соответственно, измерения проводились по трехточечной схеме, когда на стопу правой ноги накладываются пара электродов, включенных в цепь генератора и в измерительный контур, а на запястье правой руки – электрод, одновременно подключенный к обоим контурам. Тем самым применяемый в данном случае БИА (с контактами по системе «рука – нога») обеспечивает протекание тока по значительной части тела, и отражает состояние организма в целом. Амплитуда напряжения зондирующего сигнала составляла 2 В при частоте 50 кГц. В измерениях регистрировался один цикл осциллограмм тока и напряжения за период ~20 мкс, по 1200 отсчетов данных. Числовые значения программно пересчитывались по закономерностям Фурье-

анализа в величины фазового угла ϕ и импеданса Z . Проводящие контактные элементы электродов представляли собой пластинки из нержавеющей стали размером 25x15 мм, подобно описанным в [12, с. 151]. Перед наложением на кожу электроды смачивались физиологическим раствором для обеспечения лучшего контакта. Как было установлено сравнительными опытами, при данной схемотехнике трехточечных измерений значения фазового угла получаются примерно в половину меньше, чем при четырехточечной схеме на аппарате «Велнесс».

Результат гипоксического воздействия оценивался также пульсоксиметром Oximetron M130B по сатурации SpO_2 (степени насыщенности гемоглобина крови кислородом).

Результаты исследования и их обсуждение

БИА измерения, проводившиеся с 2022 по 2024 г., для относительно здорового человека показали сезонные колебания значений фазового угла ϕ (рис. 1). Как можно видеть, в летние месяцы величина ϕ в целом выше, в то время как зимой ниже.

Наблюдаемые отдельные выбросы величины ϕ могут быть связаны как с реальным состоянием организма, например по при-

чине предшествующей измерению интенсивной физической нагрузки, так и с некоторой статистической погрешностью ввиду несколько отличающегося положения электродов, при недостаточно плотном контакте их с кожей и т.п. Тем самым можно полагать, что зависимость в целом определяется уровнем физической активности человека, питания и прочими сезонными факторами. Действительно, летом поступление энергетически важных компонентов обеспечивает повышенную проводимость и активный перенос жидкостей и зарядов, что соответствует открытости клеточных мембран, росту фазового угла ϕ и снижению величины импеданс-сопротивления.

Долговременные БИА измерения в течение нескольких месяцев применения дыхательных упражнений для относительно здорового человека показывают, как правило, прирост величины фазового угла [13]. Физиологически этот факт можно интерпретировать как увеличение функциональной проницаемости клеточных мембран, что соответствует повышению проводимости и интенсивности процессов массопереноса в жидкостях организма, сопровождающему, например, рост мышечной массы у спортсменов.

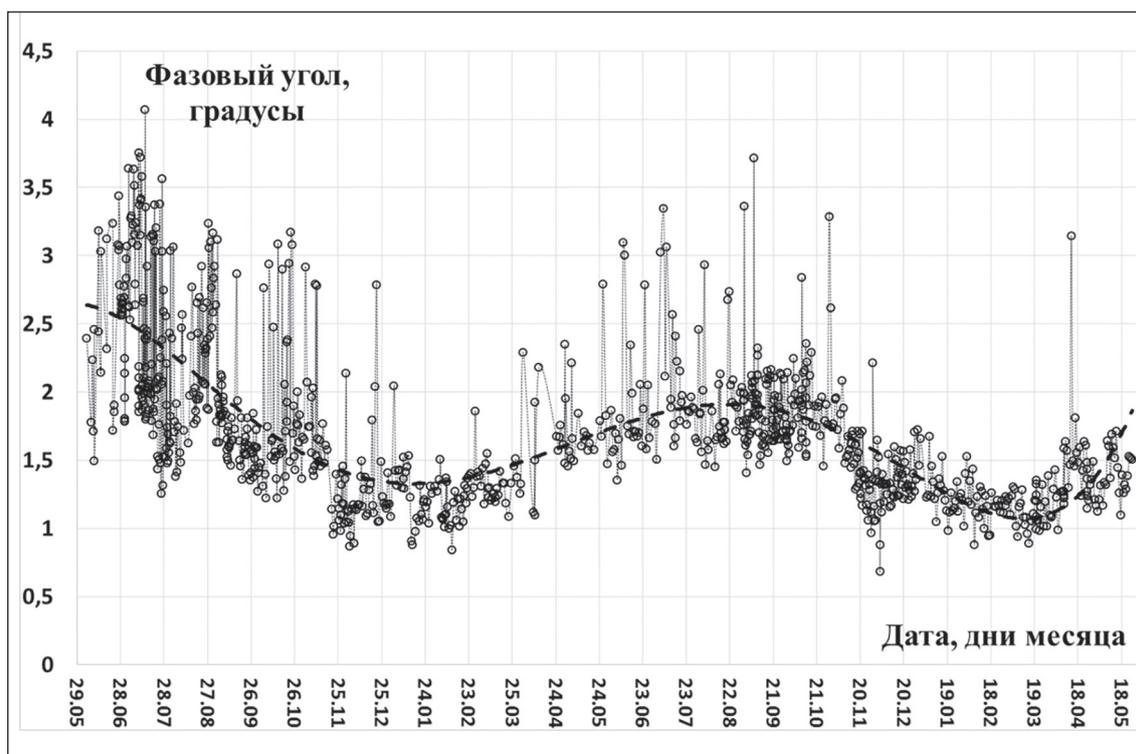


Рис. 1. Величина сдвига фазового угла между сигналами тока и напряжения при биоимпедансных измерениях в зависимости от времени года. Продолжительность наблюдений 2 года
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

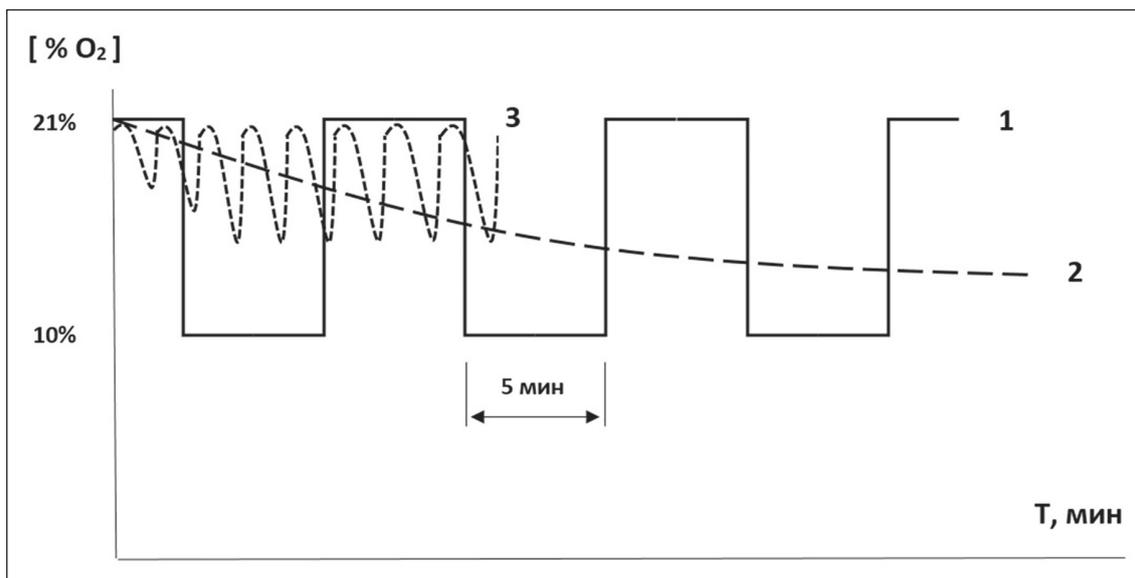


Рис. 2. Сравнение по степени гипоксии и по времени процедур нормобарической интервальной гипокситерапии (1), дыхания в гипоксической палатке (2), и при упражнении «произвольная зевота» (3)
 Источник: составлено автором на основе [3, 14]

Способы кратковременного гипоксического воздействия отличаются по глубине физиологического расслабления организма. В методе интервальной нормобарической гипокситерапии при подаче в маску воздуха с пониженной концентрацией кислорода происходит резкая смена режимов дыхания [3], что, безусловно, провоцирует некоторый стресс в организме (рис. 2, кривая 1).

Применение гипоксической палатки «горный воздух» задает постепенное изменение концентрации O_2 во вдыхаемом воздухе (рис. 2, кривая 2). Плавный переход обеспечивает комфортное состояние и расслабление организма, что является важным элементом для повышения эффективности лечебно-оздоровительной процедуры.

Можно отметить также безаппаратный метод «произвольной зевоты», при котором на выдохе производится задержка дыхания, но лишь пока сохраняется комфортное без перенапряжения состояние [14]. Это условие, а также вдох, выполняемый как имитация зевоты, способствуют глубокому «гипоксическому расслаблению» организма, активизируя внутриклеточное (тканевое) дыхание, что заметно по постепенно увеличивающейся комфортной задержке дыхания (рис. 2, кривая 3).

В ходе гипоксических исследований использовалась портативная палатка размером 1x0,5x0,5 м. В объеме палатки находи-

лись голова и плечи человека в лежачем положении. Воздух с заданной концентрацией кислорода подавался с расходом 10 л/мин от гипоксикатора YS-800H. Концентрация O_2 контролировалась по прилагаемым к аппарату таблицам и кислородным анализатором CY-12C. По заключению МЗ Республики Беларусь, гипоксическая палатка имеет статус «дыхательный тренажер», и исследования проводились с «практически здоровыми» людьми, общим числом несколько десятков человек. В ходе процедур испытываемые, как правило, пробовали применить дыхательное упражнение «произвольная зевота».

Типичные результаты гипоксического воздействия в ходе процедуры в палатке в течение 1 ч представлены на рис. 3. В данном случае концентрация кислорода снижалась от атмосферного значения 21% до ~12%, что соответствовало эквивалентной высоте до 4500 м.

Как видно, частота сердечных сокращений в ходе процедуры изменялась незначительно. Насыщенность SpO_2 гемоглобина крови кислородом то уменьшалась, то подрастала в пределах некоторого коридора значений, с периодом до нескольких минут, при общей тенденции к снижению. В итоге в конце часового пребывания в гипоксической атмосфере верхний уровень SpO_2 составлял ~80%, а нижний предел доходил до ~70% и менее.

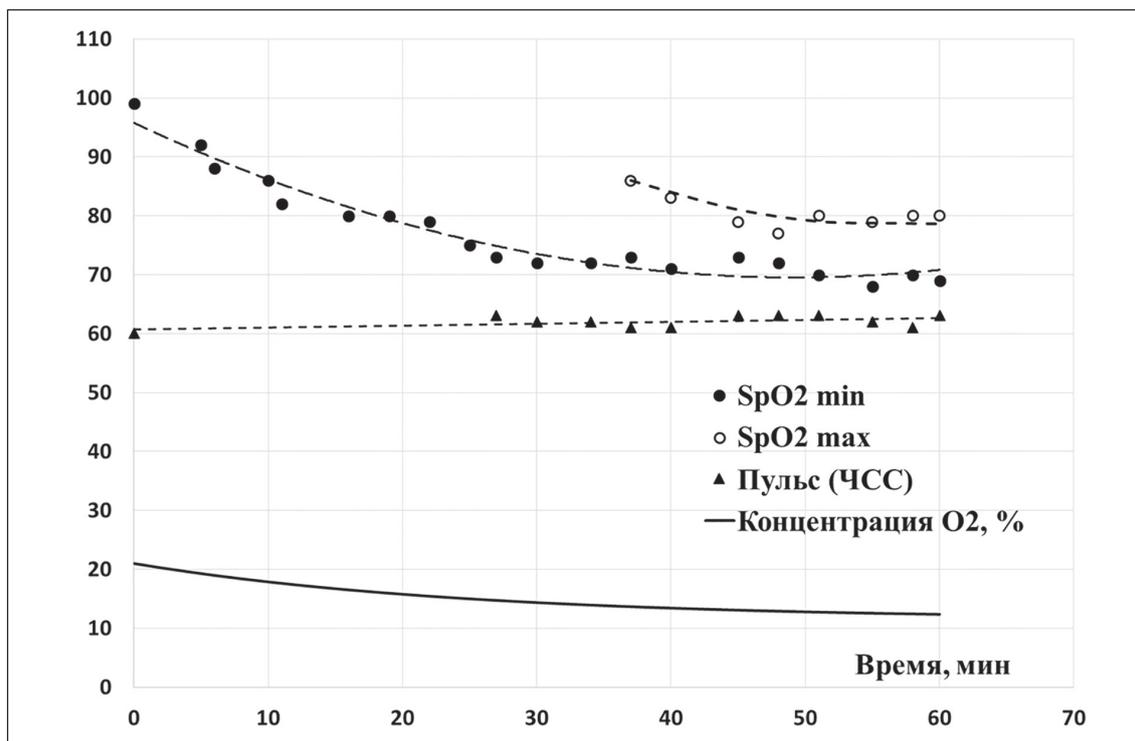


Рис. 3. Изменение насыщенности гемоглобина крови кислородом (сатурация SpO_2 , максимальная и минимальная) и пульс (частота сердечных сокращений) во время прохождения процедуры в гипоксической палатке в течение 1 ч, при уменьшающейся до 12% концентрации кислорода (эквивалентная высота до 4500 м)
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

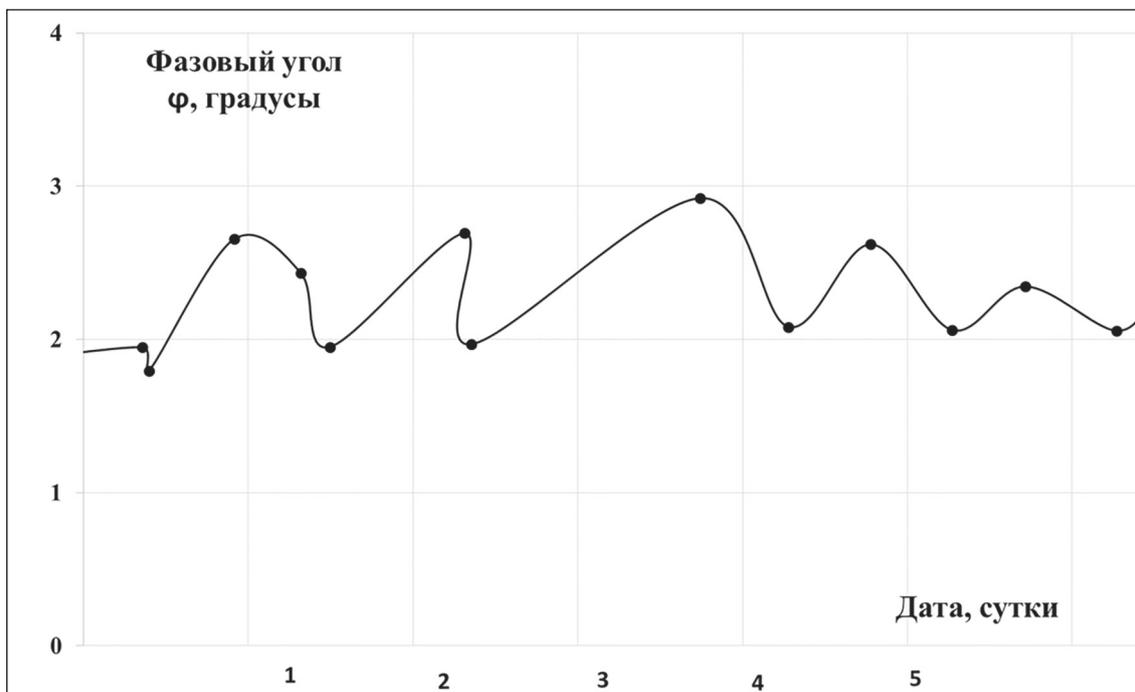


Рис. 4. Изменения фазового угла ϕ сдвига между сигналами тока и напряжения при биоимпедансном анализе после прохождения процедуры в гипоксической палатке в течение часа при концентрации кислорода 17–18% (эквивалентная высота до 1500 м)
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

БИА перед процедурой и сразу после окончания, как правило, показывал уменьшение фазового угла на величину $0,1-0,5^\circ$, что можно интерпретировать как показатель степени расслабления организма человека в ходе процедуры. Соответственно кратковременное снижение φ (зарядка клеточных мембран) представляется фактором, способствующим оздоровлению. Также уменьшение фазового угла для людей с осложнениями (воспаление суставов, поясничные боли, и др.) происходит не только из-за сниженной физической активности, но и ввиду включения физиологических процессов, противодействующих развитию патологий.

После процедуры проводились периодические БИА измерения для изучения воздействия умеренной гипоксии. Как правило, на протяжении нескольких дней регистрировалось возникновение колебаний величины фазового угла φ . Например, после гипоксического воздействия в течение 1 ч при сниженной до 17% концентрации кислорода амплитуда колебаний могла превышать исходный уровень в полтора раза (рис. 4).

После более интенсивного гипоксического воздействия в виде сна в палатке

в течение 6 ч в организме возникли и продолжались в течение нескольких суток колебания фазового угла φ с почти двукратным превышением от исходного состояния (рис. 5).

Известно, что возникновение колебаний физиологических параметров и развитие автоволновых процессов в биологической системе, как правило, сопровождается структурными изменениями [15, 16]. Для человеческого организма после применения умеренного гипоксического воздействия этот факт демонстрирует, что адаптация к гипоксии вызывает соответствующую перестройку физиологических процессов и биоструктур. В аспекте оздоровления биофизическая самоорганизация обеспечивает увеличение иммунного отклика и запаса устойчивости клеток от перерождения [2].

Нужно отметить, что эффект углубленного расслабления, заметный помимо БИА, например, по появлению слезотечения, выделению насморка, наступлению рефлекторной зевоты и прочим проявлениям, имеет относительно субъективный характер и достигается не сразу и не у всех испытуемых, проходящих процедуру.

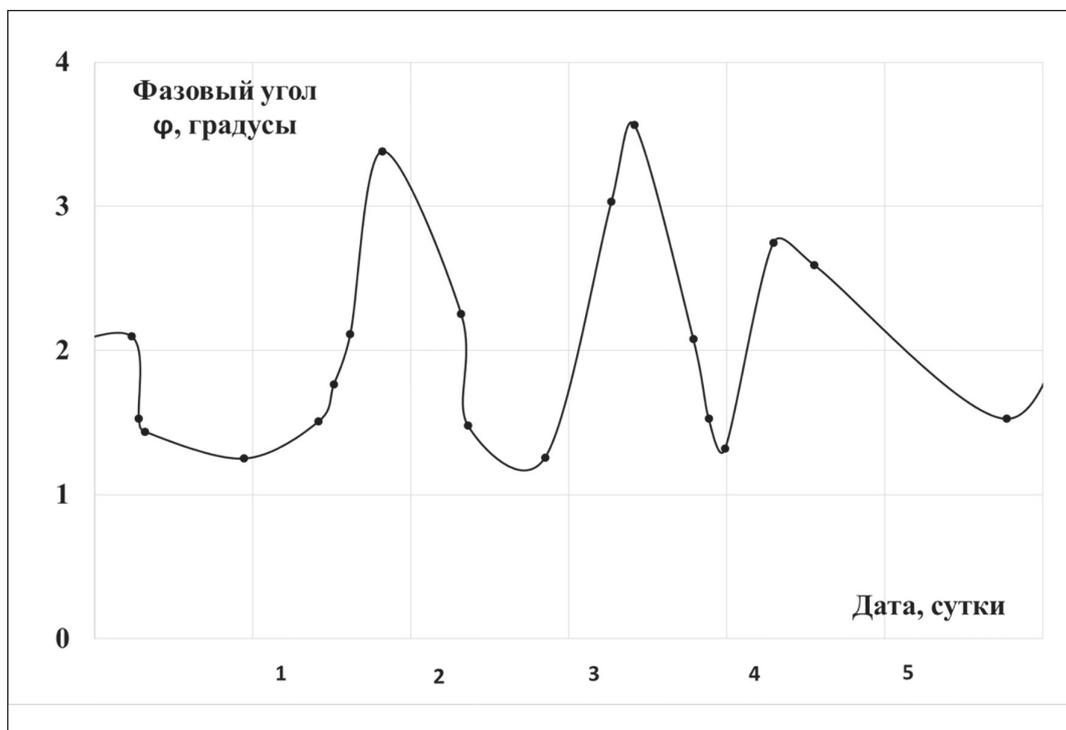


Рис. 5. Изменение фазового угла φ сдвига между сигналами тока и напряжения при биоимпедансном анализе за период наблюдений нескольких дней после сна в течение 6 ч в гипоксической палатке при концентрации кислорода 17–18% (эквивалентная высота до 1500 м)
Источник: составлено автором по результатам данного исследования

Использование физиологических процессов адаптации к гипоксии представляется актуальным, в частности, для лечения патологий воспалительного характера. Например, как отмечалось с физической точки зрения, формирование хронически воспаленной зоны с повышенным энерговыделением обуславливает онкогенез, поскольку ввиду сдвига химического равновесия вместо нормальных реакций химической индукции становится возможным подхват и развитие более энергозатратных процессов (преимущественный гликолиз вместо фосфорилирования и др.) [17]. Перевод организма в состояние гипоксического расслабления снижает уровень энергетической активности и способствует устранению зоны воспаления.

Заключение

Величина сдвига фазового угла между сигналами тока и напряжения при биоимпедансном анализе может служить показателем отклика организма на умеренное гипоксическое воздействие при дыхании воздухом с пониженной концентрации кислорода.

Продолжительная статистика величины фазового угла обнаруживает сезонные колебания активности физиологических процессов в организме, определяемые уровнем физической активности человека и характером питания.

Обнаруженный эффект возникновения колебаний величины фазового угла в течение нескольких суток после процедур умеренного гипоксического воздействия (часовое пребывание или сон до десятка часов в палатке «горный воздух») показывает, что адаптация к гипоксии сопровождается активизацией физиологических процессов и формированием новых биоструктур.

Снижение величины фазового угла, сопровождающее увеличение концентрации ионов на клеточных мембранах и снижение проводимости, и при долговременном наблюдении воспринимаемое как свидетельство неблагоприятных изменений в организме, при одновременных измерениях может иметь различную природу. Сезонное снижение в зимний период может определяться ограничением пребывания на свежем воздухе, изменением рациона питания. Для относительно здорового человека состояние с низким значением сдвига фазы может быть временным, вызываемым, например, малоподвижным образом жизни. Некоторое уменьшение величины фазового угла при измерениях перед гипоксической процедурой и непосредственно после окончания можно использовать как пока-

затель относительно полноценного расслабления организма. В целом снижение величины фазового угла представляется откликом в виде физиологических процессов самоорганизации организма человека как неравновесной системы, направленных на устранение отклонений от нормально функционирования.

Использование процедур умеренного дыхания с биоимпедансным контролем может оказаться полезным для сопровождения медицинских мероприятий, в частности при лечении хронических процессов воспалительного характера.

Список литературы

1. Гридин Л.А. Современные представления о физиологических и лечебно-профилактических эффектах действия гипоксии и гиперкапнии // Медицина. 2016. № 3. С. 45–68. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-predstavleniya-o-fiziologicheskikh-i-lechebno-profilakticheskikh-effektyah-deystviya-gipoksii-i-giperkapnii> (дата обращения: 01.06.2025).
2. Шушков С.В. Восстановительный потенциал организма при контролируемом умеренном дыхании // Научное обозрение. Биологические науки. 2022. № 1. С. 62–67. DOI: 10.17513/srbs.1262. URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1262> (дата обращения: 01.06.2025).
3. Нормобарическая гипокситерапия. Методические рекомендации. МЗ РФ. Под ред. Стрелкова Р.Б. 3-е изд. М., ПАИМС, 2001. 16 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://hypoxicom.cp18415.tmweb.ru/wp-content/uploads/2019/03/metod1.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).
4. Глушков С.П., Осипов В.М., Пищалов Е.В. Воздействие ночной нормобарической гипоксии и интервальной гипоксической тренировки на организм атлетов // Сибирский педагогический журнал. 2015. № 3. С. 153–158. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-nochnoy-normobaricheskoy-gipoksii-i-intervalnoy-gipoksicheskoy-trenirovki-na-organizm-atletov/viewer> (дата обращения: 01.06.2025).
5. Марущенко В.Л., Гаврилова А.С., Самарская Т.А., Скворцова А.А. Дышим с пользой для здоровья. М.: Эксмо, 2008. 320 с. [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/004034_000032_PEGUB-RU_Пермская+ГОУБ_0000038989/ (дата обращения: 01.06.2025). ISBN: 978-5-699-30291-8
6. Kyle U.G., Bosaeus I., De Lorenzo A.D., Deurenberg P., Elia M., Manuel Gómez J., Liliental B. Heitmann, Kent-Smith L., Melchior J.-C., Pirlich M., Scharfetter H., Schols A.M.W.J., Pichard C. Bioelectrical impedance analysis: part I: review of principles and methods // *Clinical Nutrition*. 2004. Vol. 23, Is. 5. P. 1226–1243. DOI: 10.1016/j.clnu.2004.06.004.
7. Kyle U.G., Bosaeus I., De Lorenzo A.D., Deurenberg P., Elia M., Manuel Gómez J., Liliental B. Heitmann, Kent-Smith L., Melchior J.-C., Pirlich M., Scharfetter H., Schols A.M.W.J., Pichard C. Bioelectrical impedance analysis-part II: utilization in clinical practice // *Clinical Nutrition*. 2004. Vol. 23, Is. 6. P. 1430–1453. DOI: 10.1016/j.clnu.2004.09.012.
8. Showkat I., Khanday F.A., Beigh M.R. A review of bio-impedance devices // *Med Biol Eng Comput*. 2023. T. 61. P. 927–950. DOI: 10.1007/s11517-022-02763-1.
9. Ямпиллов С.С., Хараев Г.И., Павлов А.Г. Изучение злокачественной опухоли кожи аппаратом биоимпедансной диагностики // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки. 2019. № 1. С. 40–44. URL: <http://www.nauteh-journal.ru/index.php/3/2019/№1/52d3a70f-425d-42ee-b4b9-63123048b50b> (дата обращения: 01.06.2025).

10. Николаев Д.В., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ: основы метода, протокол обследования и интерпретация результатов. 17 с. [Электронный ресурс]. URL: https://medass.su/wp-content/uploads/2017/03/intro_lesson.pdf (дата обращения: 01.06.2025).
11. АРМ «Медсканер БИОРС». 36 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.biors.ru/static/up/files/medscanner-reports.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).
12. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ состава тела человека. М.: Наука, 2009. 392 с. (в пер.). [Электронный ресурс]. URL: <https://medass.su/wp-content/uploads/2017/03/book2009.pdf>. (дата обращения: 01.06.2025). ISBN 978-5-02-036696-1.
13. Шушков С.В. Биоимпедансная диагностика при умеренном гипоксическом воздействии // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2 (116). Ч. 2. С. 34–37. URL: <https://research-journal.org/archive/2-116-2022-february/bioimpedansnaya-diagnostika-pri-umerennom-gipoksicheskom-vozdeystviu> (дата обращения: 01.06.2025). DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.037.
14. Шушков С.В. Произвольная зевота как гипоксическая процедура // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2020. Вып. 77. С. 69–76. URL: <https://cfpd.elpub.ru/jour/article/view/822>. (дата обращения: 01.06.2025). DOI: 10.36604/1998-5029-2020-77-69-76.
15. Твердислов В.А., Яковенко Л.В. Активные среды, автоволны и самоорганизация. От физико-химических систем к биологическим и социальным системам // Российский химический журнал. 2000. Т. 44. № 3. С. 21–32. URL: <https://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2000-3/21.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).
16. Trzaska Z. Oscillations in Biological Processes. In: *Mathematical Modelling and Computing in Physics, Chemistry and Biology. Studies in Systems, Decision and Control* // Springer, Cham. 2023. Vol. 495. P. 161–190. DOI: 10.1007/978-3-031-39985-5_5.
17. Шушков С.В. Газоразрядная аналогия для онкогенеза // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики // Серия Естественные и Технические Науки. 2019. № 1. С. 27–35. URL: <https://www.nauteh-journal.ru/files/77068cea-a205-4822-aff4-afdbca40b97b> (дата обращения: 01.06.2025).

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 616.8:615.9

**ОБЩИЕ ПАТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ
НЕЙРОТОКСИЧНОСТИ****Иванов М.Б.***ООО «Научно-производственный центр Энзим», Санкт-Петербург,
e-mail: maybenivamp@gmail.com*

В статье обсуждается нейротоксичность – особая форма токсического процесса на организменном уровне и свойство химических веществ природного (экзогенных и эндогенных) или синтетического происхождения прямо или опосредованно, действуя на биологическую систему немеханическим путем, формировать нарушения структуры и/или функции нервной системы (отдельных ее гистологических и анатомических элементов), проявляющиеся двигательными, сенсорными, вегетативными, когнитивными, эмоциональными и поведенческими расстройствами. Целью настоящего обзора стал поиск и системный анализ доказанных современных научных знаний о патогенетических механизмах инициации, формирования, развития, поддержания и прогрессирования нейротоксических процессов и нейродегенерации. Методологической основой исследования стал обзор более 200 источников, приоритетом которого был поиск по специфическому набору ключевых слов для обеспечения релевантных выводов. Профильные базы данных использовались для выявления эксклюзивных ресурсов, отслеживая события с 2000 по 2025 г. Полученные данные подробно описывают нейродегенерацию как проявление нейротоксического действия химических веществ – комплекс универсальных патофизиологических и патологоанатомических процессов, инициированных нейротоксикантом, включающий, в большей или меньшей степени, нейровоспаление, оксидативный стресс, эксайтотоксичность, митохондриальную дисфункцию, подавление нейрогенеза и глиогенеза, эндотелиальную дисфункцию и повышение проницаемости гематоэнцефалического барьера, аутофагию и апоптоз. Таким образом определено, что патогенез нейротоксического действия и связанной с ней нейродегенерации – мультифакторный феномен с параллельно и/или последовательно развивающимися взаимозависимыми патологическими процессами, при этом степень их вовлечения и динамика формирования могут отличаться в зависимости от химического агента, запускающего токсический процесс. Это полипатогенетическое взаимодействие повреждающих факторов приводит к серьезным медицинским проблемам, включая танатогенные риски.

Ключевые слова: нейротоксичность, эксайтотоксичность, митохондриальная дисфункция, нейровоспаление, токсический процесс, нейродегенерация

GENERAL PATHOGENETIC MECHANISMS OF NEUROTOXICITY**Ivanov M.B.***LLC Scientific and Production Center Enzyme, Saint Petersburg,
e-mail: maybenivamp@gmail.com*

The article discusses neurotoxicity – a special form of toxic process at the organism level and the property of chemical substances of natural (exogenous and endogenous) or synthetic origin, directly or indirectly, acting on the biological system in a non-mechanical way, to form disturbances of the structure and/or function of the nervous system (its individual histological and anatomical elements), manifested by motor, sensory, vegetative, cognitive, emotional and behavioral disorders. The purpose of this review was to search for and systematically analyze proven modern scientific knowledge about the pathogenetic mechanisms of initiation, formation, development, maintenance and progression of neurotoxic processes and neurodegeneration. The methodological basis of the study was a review of more than 200 sources, the priority of which was the search by a specific set of keywords to ensure relevant conclusions. Profile databases were used to identify exclusive resources, tracking events from 2000 to 2025. The obtained data describe in detail neurodegeneration as a manifestation of the neurotoxic effect of chemicals – a complex of universal pathophysiological and pathoanatomical processes initiated by a neurotoxicant and including, to a greater or lesser extent, neuroinflammation, oxidative stress, excitotoxicity, mitochondrial dysfunction, suppression of neurogenesis and gliogenesis, endothelial dysfunction and increased permeability of the blood-brain barrier, autophagy and apoptosis. Thus, it was determined that the pathogenesis of neurotoxic action and associated neurodegeneration is a multifactorial phenomenon with parallel and / or sequentially developing interdependent pathological processes, while the degree of their involvement and the dynamics of formation may differ depending on the chemical agent that triggers the toxic process. This polypathogenetic interaction of damaging factors leads to serious medical problems, including thanatogenic risks.

Keywords: neurotoxicity, toxic process, excitotoxicity, neuroinflammation, mitochondrial dysfunction, neurodegeneration

Введение

Нейротоксичность, как особая форма токсического процесса на организменном уровне, в своей основе имеет совокупное

влияние свойств нейротоксиканта и реализации токсического процесса на молекулярном (субклеточном), клеточном, органном, системном и организменном уровне

[1; 2, с. 1–20; 3, с. 11–18]. Нейротоксичность формируется как результат непосредственного воздействия токсикантов на нервную систему и/или опосредованного путем поражения других органов и систем [4]. В связи с этим следует подчеркнуть, что любая интоксикация, другие формы токсического процесса на уровне организма, а также широкий спектр соматической патологии, включая инфекционные процессы, сопровождаются явлениями нейротоксичности [2, с. 109–112]. Следовательно, нейротоксичность обусловлена немеханическим воздействием химических веществ на структуру и/или функцию центральной и/или периферической нервной системы, посредством нарушения гомеостаза и, соответственно, изменения всех видов метаболизма нервной ткани и/или морфо-функционально связанных тканей, а также нарушения процессов генерации, проведения и передачи нервного импульса. Следствием нейротоксического процесса становятся нарушения моторных, сенсорных и когнитивных функций нервной системы, эмоций и поведения, значительную роль играют нарушения механизмов нервной регуляции функций жизненно важных органов и систем [1; 2, с. 79–95; 4].

Таким образом, автор сформулировал определение, что *нейротоксичность – это свойство химических веществ природного (экзогенных и эндогенных) или синтетического происхождения прямо или опосредованно, действуя на организм немеханическим путем, формировать нарушения структуры и/или функции нервной системы (отдельных ее гистологических и анатомических элементов), проявляющиеся двигательными, сенсорными, вегетативными, когнитивными, эмоциональными и поведенческими расстройствами.*

Не всегда удается легко установить нейротоксическое воздействие различных веществ. Диагностика судорог, сенсорных галлюцинаций, утраты памяти и прочих ярко выраженных симптомов осуществляется достаточно легко. Тем не менее значительное количество признаков нейротоксического процесса способны распознать исключительно врачи-неврологи или психиатры. Такие состояния, как сонливость, умеренные головные боли и легкая бессонница, могут длительное время не предъявляться в числе жалоб у пострадавших от отравления [2, с. 108–149; 4].

Целью настоящего обзора стал поиск и системный анализ доказанных современных научных знаний о патогенетических механизмах инициации, формирования, развития, поддержания и прогрес-

сирования нейротоксических процессов и нейродегенерации.

Материалы и методы исследования

Основу методологии поиска и анализа научной литературы в данном исследовании составила конкретизация цели и формулирование адекватных цели задач. Поиск источников информации начинался с определения критериев отбора ключевых слов под цель и задачи. Следующим элементом стало выявление с помощью ключевых слов и их сочетаний уникальных ресурсов, отслеживая события с 2000 по 2025 г., и обработка более 200 научных источников с использованием профильных научных баз данных: PubMed, Scopus, Web of Science, eLibrary, Frontiersin.org и Cyberleninka.ru. Дополнительно использовались публичные поисковые системы Google и Яндекс для дальнейшего расширения сферы поиска. Одним из элементов исследования стал анализ данных, включающий в себя критическую оценку выбранных источников. Из массива проанализированных источников были отобраны 26 наиболее релевантных для цитирования в итоговой работе. Важно отметить, что отбор источников осуществлялся не только по количеству цитирований, но и по актуальности и методологической строгости представленных исследований, надежности данных.

Таким образом, методология поиска и анализа научной литературы, используемая в данном исследовании, представляла собой комплексный подход с тщательной методической экспертизой для обеспечения достоверности и обоснованности сформулированных выводов и заключения. В процессе научного поиска и исследования материалов выявленных источников были систематизированы лежащие в основе нейротоксичности и нейродегенерации патофизиологические механизмы и общепатологические особенности.

Результаты исследования и их обсуждение

Токсические процессы, развивающиеся в анатомо-топографических и функциональных структурах, отделах, компонентах и элементах нервной системы сопровождаются ее функциональными и/или структурными изменениями, что проявляется широким спектром комплексных психических, неврологических, соматовегетативных симптомов и синдромов. Формирование и развитие проявлений нейротоксического действия обусловлено острым и/или хроническим, прямым и/или опосредованным воздействием эндо- и/или экзотоксиканта

на структуры-мишени центральной нервной системы (ЦНС), вегетативной нервной системы и периферической нервной системы и может быть связано с поражением других органов и систем [1; 2, с. 79–95; 4].

Анатомо-физиологические особенности нервной системы являются базисом и первопричиной многообразия механизмов нейротоксического действия и вариативности его проявлений. Развивающиеся признаки токсического процесса являются следствием взаимодействия токсикантов с целевыми молекулами биологической системы, при этом условия взаимодействия, физико-химические свойства, пространственная структура и доза токсиканта, свойства и функциональное состояние организма или отдельных его элементов оказывают существенное влияние на механизмы формирования и проявления токсического процесса [2, с. 1–20]. В научной среде нейротоксикологов принято дифференцировать острые, подострые и хронические нейротоксические процессы и выделять среди них центральные и/или периферические, а также характеризовать их как преимущественно сопровождающиеся структурными и/или функциональными изменениями [1; 4; 5].

Существует мнение, что развитие острого нейротоксического процесса, как правило, сопровождается преимущественно функциональными изменениями, при этом изменения морфологической структуры ткани и клеток если и возникают, то, вероятно, носят временный и обратимый характер. При этом авторы отмечают, что при явлениях хронической нейротоксичности на первый план выходят явления полной или частичной нейродегенерации, которая неминуемо сопровождается проявлениями нарушения функции нервной системы [4–6].

В целом нейротоксиканты подразделяются на те, которые вызывают преимущественно органические (структурные) повреждения нервной ткани (отдельных компонентов), или те, которые изменяют ее функцию. При этом нарушение функционирования нервной системы под воздействием нейротоксиканта может реализовываться путем изменения концентрации нейротрансмиттеров и/или их дисбаланса, за счет формирования дисфункции ионных каналов, модификации пластического и/или энергетического обмена клеток нервной ткани, а также через изменение мозговой гемо- или ликвородинамики [6–8]. Однако встречается большая группа веществ, которые способны первично инициировать структурные или нейродегенератив-

ные изменения, например демиелинизацию нервных волокон и аксональную дегенерацию, нарушение целостности мембран нейронов, спонтанную деполяризацию и гибель клеток [4; 9; 10]. Тем не менее в подавляющем большинстве случаев следует говорить о структурно-функциональных нарушениях в центральных и/или периферических отделах нервной системы, а соответственно, о большей или меньшей степени выраженности нейродегенерации и сопровождающих ее функциональных изменениях или, наоборот, о функциональных нарушениях и сопровождающих их явлениях нейродегенерации [7; 9].

На сегодняшний день можно констатировать, что нейродегенерация, как проявление нейротоксического действия химических веществ, – комплекс универсальных патологических и патологоанатомических процессов, инициированных нейротоксикантом, включающий, в той или иной степени, нейровоспаление, оксидативный стресс, эксайтотоксичность, митохондриальную дисфункцию, подавление нейрогенеза и глиогенеза, эндотелиальную дисфункцию и повышение проницаемости гематоэнцефалического барьера (ГЭБ), аутофагию, апоптоз и некроз [1]. Патогенез нейротоксического действия и связанной с ним нейродегенерации обусловлен параллельно и/или последовательно развивающимися взаимозависимыми процессами нарушения регуляции гомеостаза и нарушенными и/или извращенными местными и системными защитно-приспособительными реакциями. При этом последовательность возникновения патогенетических элементов, динамика их трансформации и степень вовлечения и значимости для текущего состояния и исхода могут отличаться в зависимости от химического агента, запускающего токсический процесс [2, с. 1–20; 4; 5].

Принято считать, что большинство нейротоксикантов и вызываемые ими нейротоксические патогенетические процессы вариативно, но неизменно, прямым или косвенным образом способствуют подавлению антиоксидантной защиты нейронов и увеличению выработки активных форм кислорода (АФК), реактивных форм азота и других реакционноспособных радикалов [11]. Развивающийся на этом фоне окислительный стресс оказывает влияние на метаболизм нейромедиаторов, подвергаящихся избыточному аутоокислению, что приводит в том числе к образованию хинонов и прогрессированию образования АФК [5; 11; 12]. Отмечено возможное накопление активных форм кислорода в процес-

се синтеза моноаминов [4]. Образующиеся избыточные активные радикалы повреждают клеточные структуры, включая белки, липиды и ДНК, что приводит к формированию «порочного круга» и способствует дисфункции нейронов и окружающих клеточных структур [13]. Оксидативный стресс приводит к нарушению работы митохондрий, ослабляет эффективность цепочки передачи электронов и вызывает дисфункцию митохондрий, которая, в свою очередь, способствует повышенной продукции АФК и создает еще один «порочный круг», усугубляющий нейродегенерацию [14–16]. Кроме того, в развитии нарушения функции митохондрий ключевую роль играет дисбаланс уровня кальция внутри них [4]. Поскольку митохондрии в данных условиях не могут поддерживать энергетический баланс клетки, то выживаемость нейронов снижается и активируются апоптотические пути [12; 17; 18].

Эксайтотоксичность является еще одним важным фактором, сопровождающим нейротоксичность, она обусловлена дисбалансом в передаче сигналов глутаматом [19; 20]. Под эксайтотоксичностью понимают патологический процесс, вызванный чрезмерной и/или длительной стимуляцией ионотропных рецепторов глутамата, приводящей к увеличению внутриклеточной концентрации кальция, что вызывает активацию ряда ферментов, разобщение митохондриальной транспортной цепи, повреждение нейронов, а как следствие, аутофагию, апоптоз и некроз [4; 5; 19].

L-глутаминовая кислота выступает одним из ключевых нейротрансмиттеров и субстратов в ЦНС млекопитающих, также являясь сигнальной внутри- и внеклеточной сигнальной молекулой. Постсинаптические рецепторы глутамата вовлечены в процессы синаптической пластичности, с помощью которой реализуются в том числе когнитивные функции мозга [20]. Изучение механизмов инициации и формирования нейродегенерации под воздействием глутамата, агонистов его рецепторов и веществ, способствующих дисбалансу нейромедиаторов, с гиперактивацией подтипов глутаматергических синапсов является одним из наиболее актуальных направлений в современной нейробиологии. В ряде исследований показана значимая роль глутаматной эксайтотоксичности в патогенезе эпилепсии, бокового амиотрофического склероза, болезни Паркинсона, мигрени, ряда деменций, в том числе болезни Альцгеймера и других социально значимых неврологических нейродегенеративных заболеваний [4; 19; 20]. Кроме того, установлена повышенная чув-

ствительность мотонейронов к эксайтотоксическому повреждению, что, вероятно, обусловлено высоким уровнем экспрессии AMPA-рецепторов глутамата, но при этом низкой экспрессией кальций связывающих белков [9; 10; 13].

Помимо патогенетических механизмов нейродегенерации, связанной с действием эндогенных эксайтотоксинов, рассматривается несколько возможных механизмов прямого эксайтотоксического действия экзогенных нейротоксикантов: так, некоторые вещества вследствие структурного сходства с глутаматом способны оказывать миметическое действие на AMPA-, канинатные и NMDA-рецепторы, некоторые ингибируют Na^+ -зависимый транспортер глутамата, другие являются субстратом для Na^+ -независимой анионной транспортной системы аминокислот, высокоспецифичной для цистина и глутамата [4; 19; 20].

При нейротоксическом воздействии в условиях дисбаланса нейромедиаторных систем, из-за прямой или опосредованной гиперактивации различных типов глутаматных рецепторов, излишнее поступление ионов кальция в клетку активирует внутриклеточные сигнальные каскады, приводящие к запуску апоптоза нейронов [20]. Принято считать нейротоксическое действие глутамата реализующимся в глутамат-чувствительных нейронах ЦНС, однако установлено, что ряд нейродегенеративных патологических процессов, сцепленных с гиперактивацией рецепторов глутамата, развивается на периферии, в неглутаматергических нейронах [11–13].

Нейротоксическое действие сопровождается дисбалансом нейротрансмиттеров и избыточным высвобождением глутамата из нейронов с одновременным подавлением его поглощения астроцитами, что приводит к чрезмерной активации AMPA, канинатных и NMDA-рецепторов. Эта сверхактивация вызывает приток ионов кальция в нейроны, что, в свою очередь, стимулирует активность Ca^{2+} -чувствительных ферментов, включая нелизосомальные цистеиновые протеазы, протеасому, NO-синтазы и фосфопротеинфосфатазы, вызывая распад компонентов цитоскелетной структуры и повреждение мембранных структур клеток. Активированная NO-синтаза способствует выработке оксида азота, который вступает в реакцию с перекисью водорода, образуя опасный радикал пероксинитрит [1]. Пероксинитрит считается одним из основных факторов повреждения клеток [14; 15; 20]. Установлено, что избыточное возбуждение NMDA рецепторов провоцирует оксидативный стресс, приво-

дыщий к нарушению поляризации мембран митохондрий [16]. Повышенный уровень кальция также нарушает работу митохондрий, вызывая высвобождение проапоптотических факторов, в том числе цитохрома С, и активируя каспазозависимые пути апоптоза [18]. Сочетание эксайтотоксичности и дисфункции митохондрий ускоряет гибель нейронов [17; 19; 20].

В подавляющем большинстве случаев нейромедиаторного дисбаланса, формирующегося при нейротоксических процессах, глутаматергическую эксайтотоксичность сопровождает обусловленная избытком дофамина, норадреналина и серотонина в синаптической щели, сниженным уровнем или блокадой обратного захвата этих нейротрансмиттеров, накопления их в синаптических пузырьках, ингибирование активности ферментов катаболизма моноаминергическая эксайтотоксичность [11; 12]. При этом оба вида эксайтотоксичности характеризуются ростом уровня внутриклеточного Ca^{2+} и функциональными расстройствами митохондрий, повреждением структурно-функциональных элементов клетки, нейровоспалением, стимуляцией аутофагии и запуском апоптотических процессов [4; 5; 21].

В дополнение к вышеизложенному отметим, что развитие множества обусловленных нейродегенерацией патологий ассоциировано с повышением уровня гомоцистеина в крови и ликворе. Эта аминокислота способна влиять на сайты связывания глутамата или глицина NMDA рецептора, что позволяет рассматривать ее как потенциальный эндогенный активирующий лиганд глутаматергических рецепторов [20; 22; 23].

В свою очередь, эксайтотоксичность, вызванная нейротоксикантами и/или являющаяся следствием нейромедиаторного дисбаланса, также провоцирует нейровоспаление и усиливает его нейротоксические эффекты. Так, чрезмерная стимуляция нейронов активирует микроглию, резидентные иммунные клетки мозга, которые высвобождают провоспалительные цитокины, такие как TNF- α и IL-1 β , а также АФК [20]. Кроме того, астроциты, которые в норме участвуют в выведении избытка глутамата и поддерживают работу нейронов, становятся реактивными в ответ на воздействие токсичных веществ. Реактивные астроциты усугубляют воспаление, высвобождая дополнительные цитокины, что способствует формированию еще одного цикла «обратной связи», который усугубляет повреждение нейронов, глиальных клеток и эндотелиоцитов [21–23]. Эти медиаторы вос-

паления еще больше повреждают нейроны и эндотелиоциты, что ведет к изменению проницаемости ГЭБ и позволяет периферическим иммунным клеткам проникать в ЦНС [24–26].

Взаимодействие между эксайтотоксичностью и нейровоспалением имеет решающее значение для развития долгосрочной нейродегенерации. Постоянная активация микроглии и астроцитов создает среду, которая поддерживает продолжающееся повреждение нейронов, что приводит к хроническому нейровоспалению. При этом совокупность факторов, включая прямое действие нейротоксикантов, обусловленный ими оксидативный стресс, факторы и продукты воспаления и эксайтотоксичности, острая гипоксия, гомоцистеин и другие эндогенные эндотелиотоксиканты при нейротоксическом процессе становятся ведущими звеньями патогенеза эндотелиальной дисфункции и как следствие повышения проницаемости ГЭБ [22; 25; 26].

Аутофагия является ранней клеточной реакцией на стресс, вызванный явлениями нейротоксичности, и активируется сигнальным путем mTOR. Хотя аутофагия служит для удаления поврежденных органелл и белков, длительная ее активация в ответ на воздействие нейротоксикантов может приводить к деградации важных клеточных компонентов, способствуя гибели нейронов [23]. Кроме того, комбинированное воздействие окислительного стресса и эксайтотоксичности активирует как каспазозависимые, так и каспазозависимые пути апоптоза, что приводит к фрагментации клеток и нейродегенерации [5; 24; 25].

Итак, нейродегенерация как проявление нейротоксического действия химических веществ – комплекс универсальных патофизиологических и патологоанатомических процессов, инициированных нейротоксикантом, замкнутых в «порочные круги», включающий, в большей или меньшей степени, нейровоспаление, эксайтотоксичность, оксидативный стресс, митохондриальную дисфункцию, нарушение синтеза высокоспециализированных специфических белков, подавление нейрогенеза и глиогенеза, демиелинизацию нервных волокон, аутофагию, апоптоз и некроз нейронов, формирование эндотелиальной дисфункции сосудов головного и спинного мозга и повышение проницаемости ГЭБ [4; 12; 24].

Выводы

1. В случае развития токсического процесса под действием нейротоксикантов следует в первую очередь полагать наличие структурно-функциональных наруше-

ний в центральных и/или периферических отделах нервной системы, а соответственно, большую или меньшую степень выраженности нейродегенерации и сопровождающих ее функциональных изменений или напротив функциональные нарушения и сопровождающие их явления нейродегенерации.

2. В патогенезе развития нейротоксичности и сопровождающей ее нейродегенерации ключевое место занимают процессы нарушения регуляции гомеостаза нервной системы и общебиологические защитно-приспособительные реакции, совокупность которых на организменном уровне приводит к серьезным медицинским проблемам, включая танатогенные риски.

3. Патогенез нейротоксического действия и связанной с ней нейродегенерации – мультифакторный феномен, когда параллельно и/или последовательно развиваются несколько взаимозависимых патологических процессов, при этом степень их вовлечения и динамика формирования могут отличаться в зависимости от химического агента, запускающего токсический процесс.

В заключение следует отметить, что нейротоксичность является сложным многоуровневым и многоаспектным патофизиологическим процессом, связанным единичными компонентами патогенеза, обуславливающими в том числе механизмы нейродегенерации при острых и хронических эндо- и экзотоксических воздействиях и требующими учета не только местных реакций и преобразований в анатомо-топографических и функциональных структурах, отделах, компонентах и элементах нервной системы, но и системных общебиологических защитных, адаптационных реакций в организме, которые могут оказывать существенное влияние на течение, прогноз и исход нейротоксического поражения.

Список литературы

1. Постников С.С., Костылева М.Н., Грацианская А.Н., Ермилин А.Е., Строк А.Б., Шатунов С.М. Нейротоксичность лекарств // Качественная клиническая практика. 2017. № 4. С. 68–72. DOI: 10.24411/2588-0519-2017-00032.
2. Экспериментальная и клиническая нейротоксикология. 2-е изд. / Под ред. Питера С. Спенсера, Герберга Г. Шаумбурга (пер. с англ. Нины В. Зайцевой). Photon Books, с разрешения издательства Оксфордского университета, 2015. 239 с. UBN: 015-A94510112013.
3. Иванов М.Б. Токсикология. Т. I. Начала токсикологии: монография. Гатчина: Княгиня Ольга, 2024. 224 с. ISBN: 978-5-6050887-8-3.
4. Головки А.И., Ивницкий Ю.Ю., Иванов М.Б., Рейнюк В.Л. Универсальность феномена «нейротоксичность» (обзор литературы) // Токсикологический вестник. 2021. Т. 29. № 5. С. 4–16. DOI: 10.36946/0869-7922-2021-29-5-4-16.
5. Wang J., Hao Y., Ma D., Feng L., Yang F., An P., Su X., Feng J. Neurotoxicity mechanisms and clinical implications of six common recreational drugs // *Frontiers Pharmacology*. 2025. Vol. 16. P. 1–16. DOI: 10.3389/fphar.2025.1526270.
6. Антонова К.В., Танамян М.М. Диабетическая нейропатия как мультисистемный процесс // Эффективная фармакотерапия. 2022. Т. 18. № 30. С. 28–37. DOI: 10.33978/2307-3586-2022-18-30-28-37.
7. Гребеньков С.В., Кочетова О.А., Милутка Е.В., Малькова Н.Ю. Профессиональная полиневропатия: современный взгляд на проблему в России и за рубежом. Обзор литературы // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 6. С. 631–635. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-6-631-635.
8. Овезов А.М., Князев А.В., Пантелеева М.В., Лобов М.А., Борисова М.Н., Луговой А.В. Послеоперационная энцефалопатия: патофизиологические и морфологические основы ее профилактики под общим наркозом. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика // *Неврология, Нейропсихиатрия, Психосоматика*. 2015. Т. 7. № 2. С. 61–66. DOI: 10.14412/2074-2711-2015-2-61-66.
9. Завалий Л.Б., Петриков С.С., Симонова А.Ю. Поцхверия М.М., Остапенко Ю.Н., Гаджиева М.Г. Характеристика неврологических расстройств у пациентов с острым отравлением таллием // *Consilium Medicum*. 2019. Т. 21. № 2. С. 24–30. DOI: 10.26442/20751753.2019.2.180162.
10. Захарова М.Н., Бакулин И.С., Абрамова А.А. Токсические поражения двигательных нейронов // *Нейрохимия*. 2021. Т. 38. № 4. С. 364–377. DOI: 10.31857/S1027813321040166.
11. Adamu A., Li S., Gao F. and Xue G. The role of neuroinflammation in neurodegenerative diseases: current understanding and future therapeutic targets // *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2024. Vol. 16. P. 1347987. DOI: 10.3389/fnagi.2024.1347987.
12. Wareham L.K., Liddel S.A., Temple S., Benowitz L.I., Di Polo A., Wellington C., Goldberg J.L., He Z., Duan X., Bu G., Davis A.A., Shekhar K., La Torre A., Chan D.C., Canto-Soler M.V., Flanagan J.G., Subramanian P., Rossi S., Brunner T., Bovenkamp D.E., Calkins D.J. Solving neurodegeneration: common mechanisms and strategies for new treatments // *Molecular Neurodegeneration*. 2022. Vol. 17, Is. 23. P. 1–29. DOI: 10.1186/s13024-022-00524-0.
13. Мухамедьяров М.А., Мартынов А.В., Петухова Е.О., Григорьев П.Н., Эшпай Р.А., Ризванов А.А., Зефилов А.Л. Периферическая дисфункция как один из механизмов патогенеза нейродегенеративных заболеваний // *Гены и Клетки*. 2015. Т. 10. № 4. С. 8–14. DOI: 10.23868/gc120465.
14. Шлапакова Т.И., Костин Р.К., Тягунова Е.Е. Активные формы кислорода: участие в клеточных процессах и развитии патологии // *Биоорганическая химия*. 2020. Т. 46. № 5. С. 466–485. DOI: 10.31857/S013234232005022X.
15. Абаленихина Ю.В., Космачевская О.В., Топунов А.Ф. Пероксинитрит: токсический агент и сигнальная молекула (обзор) // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2020. Т. 56. № 6. С. 523–535. DOI: 10.31857/S0555109920060021.
16. Dmytriv T.R., Duvé K.V., Storey K.B. and Lushchak V.I. Vicious cycle of oxidative stress and neuroinflammation in pathophysiology of chronic vascular encephalopathy // *Frontiers in Physiology*. 2024. Vol. 15. P. 1443604. DOI: 10.3389/fphys.2024.1443604.
17. Бельских Э.С., Звягина В.И., Урясьев О.М. Современные представления о патогенезе и подходах к коррекции митохондриальной дисфункции // *Наука молодых (Eruditio Juvenium)*. 2016. Vol. 1. С. 104–112. URL: https://naukamolod.rzgm.ru/uploads/art/art207_951569.pdf (дата обращения: 20.06.2025).
18. Шакова Ф.М., Кирова Ю.И., Романова Г.А. Современный этап нейропротекции – развитие митохондриально-направленных подходов // *Патогенез*. 2020. Т. 18. № 2. С. 4–19. DOI: 10.25557/2310-0435.2020.02.4-19.
19. Архипов В.И., Капралова М.В., Першина Е.В. Экаситотоксичность и экспериментальные подходы к нейропротекции // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10431> (дата обращения: 20.06.2025).

20. Armada-Moreira A., Gomes J.L., Pina C.C., Savchak O.K., Gonçalves-Ribeiro J., Rei N., Pinto S., Morais T.P., Martins R.S., Ribeiro F.F., Sebastião A.M., Crunelli V. and Vaz S.H. Going the Extra (Synaptic) Mile: Excitotoxicity as the Road Toward Neurodegenerative Diseases // *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2020. Vol. 14. P. 90. DOI: 10.3389/fncel.2020.00090.
21. Clark I.A., Vissel B. Excess cerebral TNF causing glutamate excitotoxicity rationalizes treatment of neurodegenerative diseases and neurogenic pain by anti-TNF agents // *J Neuroinflammation*. 2016. Vol. 13. P. 236. DOI: 10.1186/s12974-016-0708-2.
22. Дубченко Е.А., Иванов А.В., Бойко А.Н., Спирина Н.Н., Гусев Е.И., Кубатиев А.А. Гипергомоцистенемия и эндотелиальная дисфункция при сосудистых и аутоиммунных заболеваниях головного мозга // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2019. Т. 119. № 11. С. 133–138. DOI: 10.17116/jnevro2019119111133.
23. Holton K.F. Micronutrients May Be a Unique Weapon Against the Neurotoxic Triad of Excitotoxicity, Oxidative Stress and Neuroinflammation: A Perspective // *Frontiers in Neuroscience*. 2021. Vol. 15. P. 726457. DOI: 10.3389/fnins.2021.726457.
24. Kaur B., Sharma P.K., Chatterjee B., Bissa B., Nattarayan V., Ramasamy S., Bhat A., Lal M., Samaddar S., Banerjee S. and Roy S.S. Defective quality control autophagy in Hyperhomocysteinemia promotes ER stress and consequent neuronal apoptosis through proteotoxicity // *Cell Commun Signal*. 2023. Vol. 21. P. 258. DOI: 10.1186/s12964-023-01288-w.
25. Зенков Н.К., Чечушков А.В., Кожин П.М., Мартинович Г.Г., Кандалицева Н.В., Меньщикова Е.Б. Аутофагия как механизм защиты при окислительном стрессе // *Бюллетень сибирской медицины*. 2019. Т. 18. № 2. С. 195–214. DOI: 10.20538/1682-0363-2019-2-195-214.
26. Ивницкий Ю.Ю., Рейнюк В.Л., Иванов М.Б., Краснов К.А., Вакуненко О.А., Шефер Т.В. Сосудистый эндотелий при острых отравлениях // *MEDLINE.RU*. 2020. Т. 21. С. 976–1004. URL: <https://medline.ru/public/art/tom21/art78.html> (дата обращения: 14.03.2025).

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТИ ПУНКТОВ ВЕСОГАБАРИТНОГО КОНТРОЛЯ

Белехов А.А., Тагильцев С.Р., Никуленков Д.В., Тумашевич Д.Г.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, e-mail: d0304200@gmail.com*

Автомобильный транспорт является основным видом транспорта в России. Превышение допустимых нагрузок не только снижает безопасность дорожного движения, но и наносит серьезный ущерб дорожному полотну. Цель исследования: обеспечение сохранности дорожной инфраструктуры и безопасности дорожного движения путем создания эффективной системы контроля и предотвращения перегруза транспортных средств, основанной на комплексном подходе с участием всех заинтересованных сторон. Мониторинг весовых параметров грузовых автомобилей позволит ускорить процесс цифровой трансформации транспортного комплекса. При проектировании дорог особенно важно учитывать взаимодействие системы «шина – покрытие», особенно для грузовых автомобилей. Статические параметры воздействия можно измерить, однако динамические нагрузки в движении сложнее оценить. Для перевозки тяжеловесных грузов необходимо учитывать множество факторов: планирование работ, расстояние, скорость, тип груза, ограничения движения, плату «Платон», оформление разрешений и состояние дороги. Решение проблемы перегруза требует комплексного подхода, включающего законодательные меры, развитие инфраструктуры и повышение ответственности участников дорожного движения. Решение проблемы перегруза на дорогах требует совместных и согласованных действий государства, транспортных компаний и водителей. Только комплексный подход, основанный на жестком контроле, развитии инфраструктуры и повышении общей ответственности, позволит обеспечить безопасность дорожного движения и сохранить дорожную сеть страны.

Ключевые слова: грузоперевозки, эксплуатация автомобильных дорог, автоматический пункт весогабаритного контроля, безопасность дорожного движения, прочность дорожных одежд

COMPREHENSIVE PLANNING SYSTEM FOR A NETWORK OF WEIGHT AND SIZE CONTROL POINTS

Belekhov A.A., Tagiltsev S.R., Nikulenkov D.V., Tumashevich D.G.

*Saint. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, e-mail: d0304200@gmail.com*

Motor transport is the main mode of transport in Russia. Exceeding permissible loads not only reduces road safety, but also causes serious damage to the roadway. The purpose of the study is to ensure the safety of road infrastructure and road safety by creating an effective system for monitoring and preventing vehicle congestion based on an integrated approach involving all stakeholders. Monitoring the weight parameters of trucks will accelerate the process of digital transformation of the transport complex. When designing roads, it is especially important to take into account the interaction of the tire-coating system, especially for trucks. Static impact parameters can be measured, but dynamic loads in motion are more difficult to assess. To transport heavy goods, many factors must be taken into account: work planning, distance, speed, type of cargo, traffic restrictions, Plato fees, permits, and road conditions. Solving the problem of congestion requires an integrated approach, including legislative measures, infrastructure development and increased responsibility of road users. Solving the problem of congestion on the roads requires joint and coordinated actions by the government, transport companies and drivers. Only an integrated approach based on strict control, infrastructure development and increased shared responsibility will ensure road safety and preserve the country's road network.

Keywords: cargo transportation, operation of highways, automatic weight and size control point, road safety, durability of road clothes

Введение

Автомобильный грузовой транспорт прочно удерживает первенство среди всех видов транспорта в России, обслуживая множество отраслей экономики и осуществляя 75% общего объема грузоперевозок страны.

Превышение допустимых весовых норм при транспортировке грузов на тяжелом автотранспорте является распространенной практикой. Такое нарушение не только создает угрозу безопасности на дорогах, но и существенно повреждает дорожное покрытие. Статистика показывает, что каждый

восьмой рейс осуществляется с нарушением весогабаритных параметров, при этом средний показатель превышения достигает 35% [1]. В результате ежегодный ущерб дорожному хозяйству страны оценивается в 2,6 триллиона рублей.

Цель исследования – обеспечение сохранности дорожной инфраструктуры и безопасности дорожного движения путем создания эффективной системы контроля и предотвращения перегруза транспортных средств, основанной на комплексном подходе с участием всех заинтересованных сторон.

Материал и методы исследования

Успешная реализация целей в области грузоперевозок невозможна без комплексного подхода к сбору информации. Помимо отслеживания интенсивности движения, критически важно фиксировать весовые характеристики грузового транспорта, что станет основой для цифровой трансформации отрасли [2].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ взаимодействия транспортно-го средства с дорожным покрытием показывает, что в области контакта колеса с дорогой формируются сложные силовые воздействия. В этой зоне действуют динамические силы различного направления: вертикальные, продольные и поперечные касательные, причем их фактическая мощность определяется состоянием дорожного покрытия, скоростью движения, параметрами автомобиля и характеристиками шин [3].

Автомобильное колесо может находиться как в неподвижном состоянии, так и в движении. Когда колесо стоит, на него действует лишь одна сила – вес автомобиля (нормальная нагрузка P_z). При этом важной характеристикой колеса является его эластичность: под действием вертикальной нагрузки оно деформируется, преодолевая сопротивление каркаса, внутреннего давления воздуха и трения в резине. В результате образуется зона контакта с дорогой, где статический радиус колеса (r_{st}) оказывается меньше, чем в остальных его частях (r_s). Основные параметры воздей-

ствия нормальной нагрузки представлены на рисунке 1.

При качении колеса по автомобильным дорогам параметры в зоне контакта шины с покрытием несколько изменяются за счёт появления крутящего (или тормозного) момента. Схема динамического взаимодействия пневматической шины с дорожным покрытием представлена на рисунке 2.

Между тем для целей проектирования автомобильных дорог важно учитывать параметры взаимодействия системы «пневматическая шина – дорожное покрытие» непосредственно на площадь контакта по выступам рисунка протектора (F_v) или в контурной площади (F_k) их контакта. Причём в первую очередь это касается шин наиболее нагруженных осей грузовых автомобилей, оказывающих наибольшее негативное воздействие на конструктивные слои дорожных одежд. Однако если статические параметры такого воздействия вполне измеряемы с помощью различных стендов и измерительного оборудования, то в реальных условиях прямолинейного качения грузового колеса при движении под нагрузкой выполнить подобные испытания весьма затруднительно даже при небольших скоростях.

Важно подчеркнуть, что динамические уравнения движения нагруженного колеса представляют собой более фундаментальный подход по сравнению со статическими уравнениями. Они позволяют не только вычислить конечные перемещения нагрузки по дорожному покрытию, но и детально проанализировать процесс достижения равновесия в системе «колесо – дорога» в динамике.

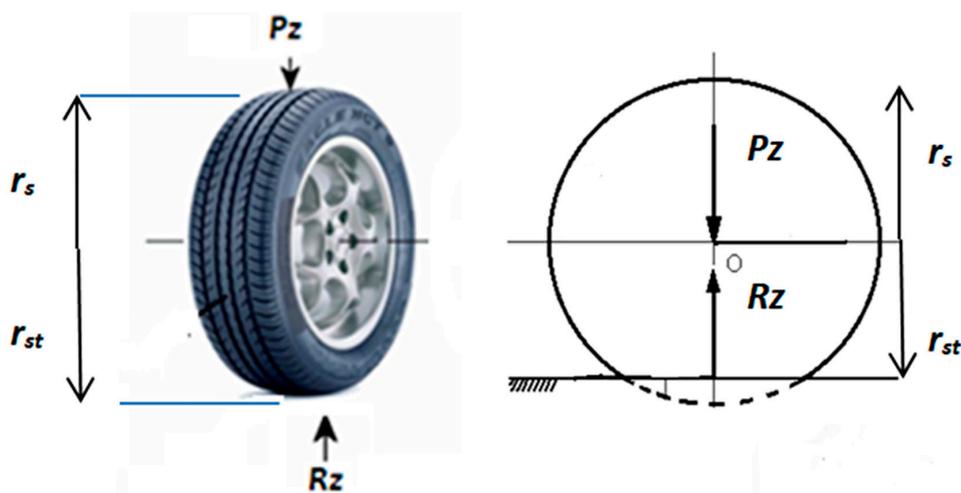


Рис. 1. Основные параметры воздействия нормальной нагрузки в системе «пневматическая шина – дорожное покрытие»: P_z – нормальная нагрузка, R_z – нормальная реакция опорной поверхности, r_s – свободный радиус колеса; r_{st} – статический радиус колеса
Источник: составлено авторами

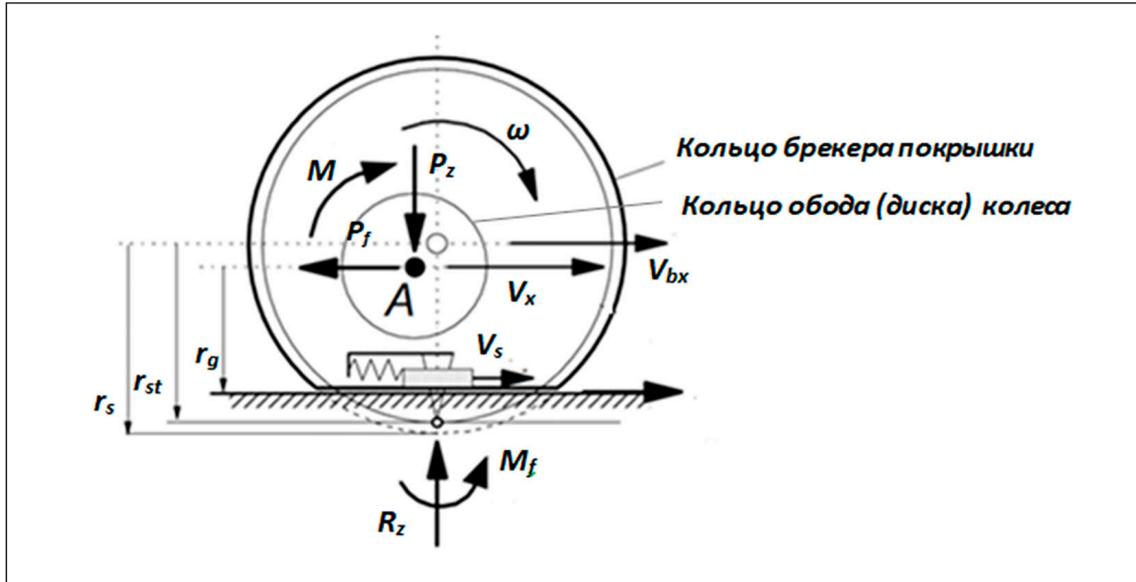


Рис. 2. Схема взаимодействия пневматической шины с твёрдой поверхностью в режиме свободного качения под нагрузкой: r_s – свободный радиус колеса, r_{st} – статический радиус колеса, r_g – кинематический радиус (радиус качения) колеса, A – ось колеса, ω – угловая скорость, M – крутящий момент колеса, P_f – сила сопротивления качению колеса, M_f – момент сопротивления качению, V_s – скорость продольного скольжения, V_x – поступательная скорость оси колеса, V_{bx} – поступательная скорость центра колеса по Н. Расејка, 2012
Источник: составлено авторами

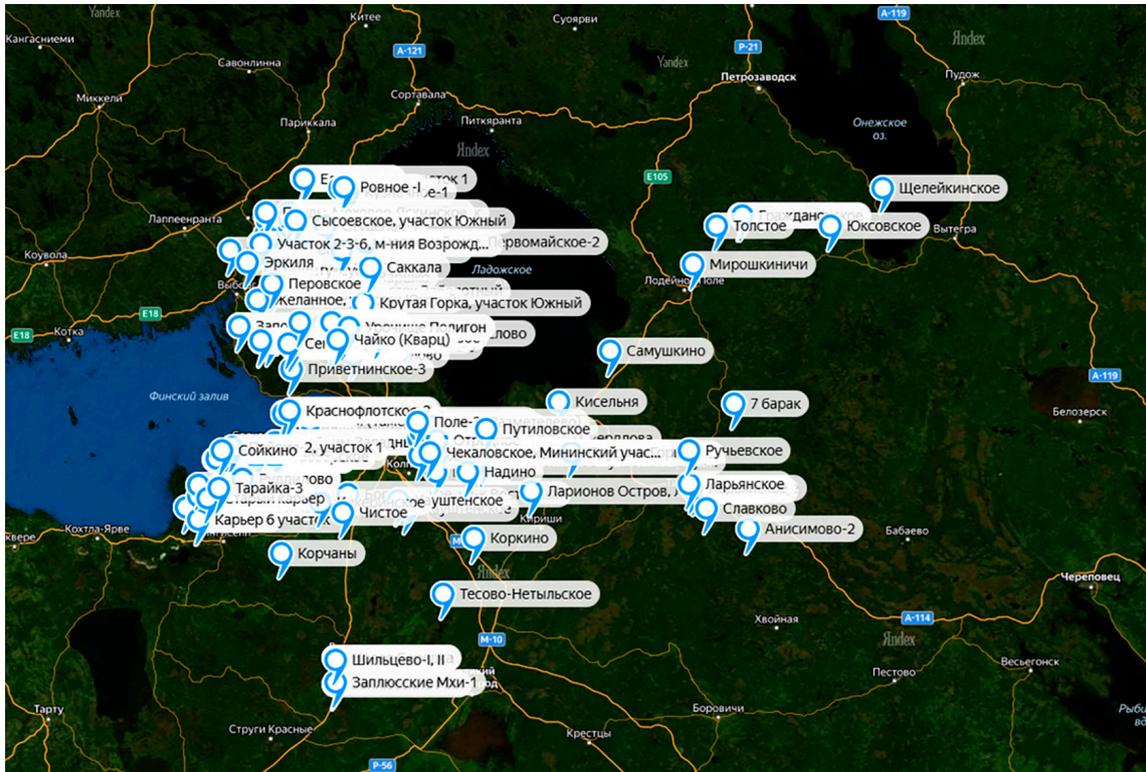


Рис. 3. Размещение действующих карьеров на территории Ленинградской области
Источник: составлено авторами

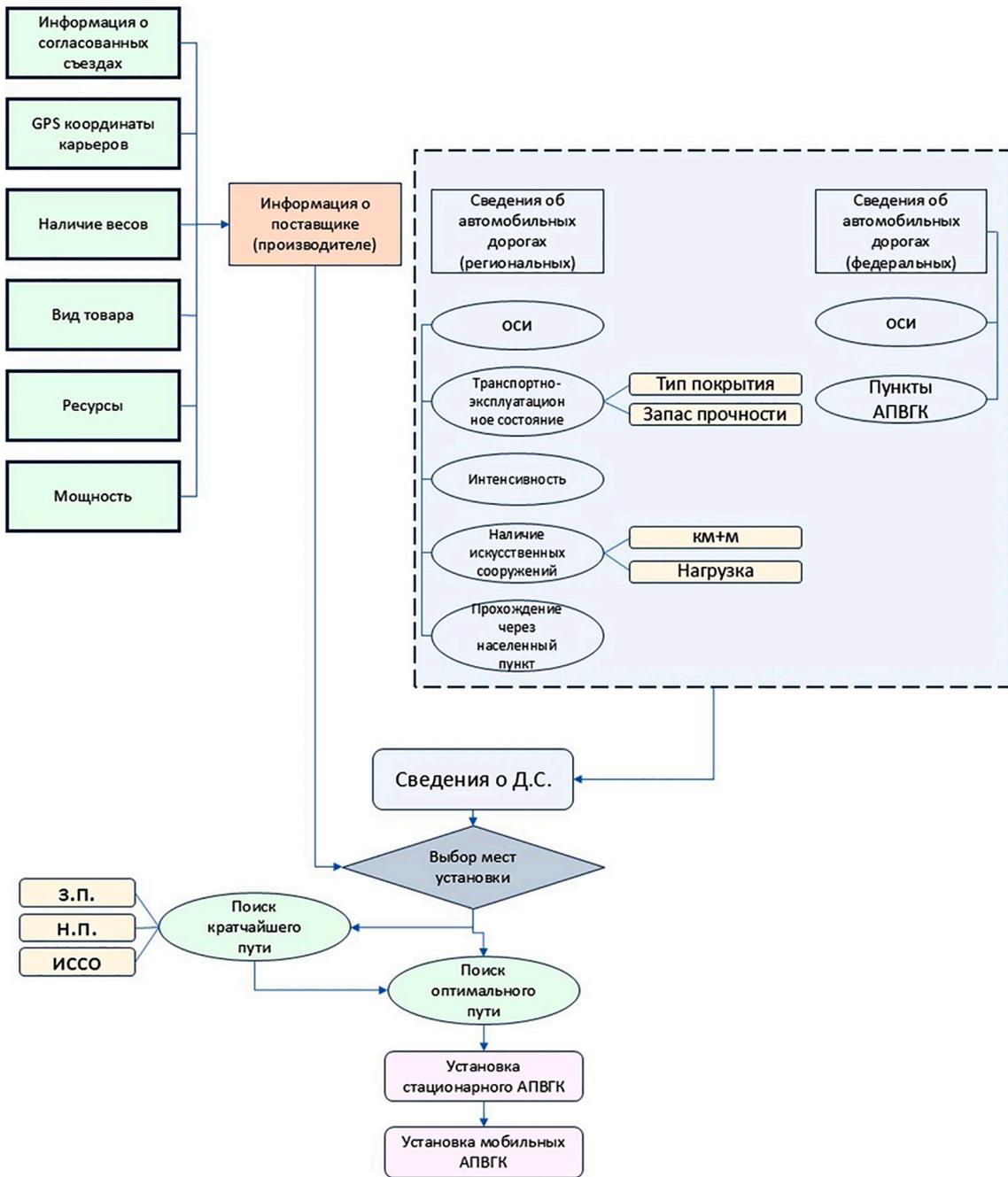


Рис. 4. Алгоритм выбора оптимального места расположения АПВГК
 Источник: составлено авторами

Статический подход, в свою очередь, дает лишь упрощенное решение и не способен точно отразить реальное воздействие движущегося транспорта на дорожное полотно. По этой причине в большинстве стран назначение параметров нормативных (расчётных) нагрузок для адекватного учета их влияния на напряжённо-деформированное состояние дорожной одежды осуществляется императивным методом, т.е. они от-

ражаются в соответствующих нормативно-технических документах или подлежат утверждению специализированным органом исполнительной власти в транспортной сфере, традиционно занимающимся разработкой единой технической политики и нормативно-правовым регулированием в дорожной отрасли [4; 5].

При организации перевозок крупногабаритных и тяжеловесных грузов важно прини-

мать во внимание целый комплекс взаимосвязанных факторов [6]. Специалисты транспортной отрасли выделяют следующие ключевые аспекты, требующие особого внимания:

- логистика транспортных средств и их эффективное распределение
- длина маршрута и особенности пути следования
- темп движения транспортного средства
- специфика груза и его особые требования
- тип транспортного средства и его технические характеристики
- дорожные ограничения, включая сезонные запреты на движение
- плата за проезд по федеральным трассам (система «Платон»)
- оформление документации для получения разрешений на проезд
- техническое состояние транспортного средства
- качество дорожного покрытия и состояние автодорожной инфраструктуры

Все эти факторы необходимо тщательно анализировать и учитывать при планировании перевозок для обеспечения безопасности, соблюдения сроков и экономической эффективности доставки.

По состоянию на 2025 год на территории Ленинградской области насчитывается 120 действующих карьеров по добыче общераспространенных полезных ископаемых. Карта размещения карьеров, а также объектов строительства представлен на рисунке 3.

Проблема перегруза на дорогах – это угроза национальной безопасности и экономике. Ежедневно тонны грузов, перевозимые сверх допустимых норм, разрушают дорожное полотно, увеличивают риск аварий и приводят к колоссальным финансовым потерям. Решение этой проблемы требует комплексного и многостороннего подхода, охватывающего законодательные акты, развитие инфраструктуры и воспитание культуры ответственности у всех участников дорожного движения [7].

Перегруз – это не просто незначительное превышение допустимой массы. Дополнительная нагрузка приводит к образованию трещин, выбоин и просадок, требующих дорогостоящего ремонта. Мосты и путепроводы проектируются с учетом определенной нагрузки. Перегруженные грузовики значительно сокращают срок их службы, что чревато обрушениями и человеческими жертвами [8; 9].

В рамках проведенного исследования разработан алгоритм выбора оптимальных мест размещения автоматических пунктов весогабаритного контроля (АПВГК). Алгоритм выбора оптимального размещения АПВГК представлен на рисунке 4.

Заключение

Таким образом, важно понимать, что борьба с перегрузом – это не только вопрос безопасности, но и экономическая целесообразность. Затраты на ремонт дорог, разрушенных из-за перегруза, значительно превышают затраты на создание и поддержание системы контроля. В долгосрочной перспективе инвестиции в борьбу с перегрузом окупаются многократно, обеспечивая сохранность дорожной инфраструктуры и снижая экономические потери. Решение проблемы перегруза на дорогах требует совместных и согласованных действий государства, транспортных компаний и водителей. Достичь высокого уровня безопасности дорожного движения и обеспечить долговечность дорожной сети можно только благодаря всестороннему подходу, который предусматривает усиленный контроль, совершенствование инфраструктуры и развитие культуры ответственного поведения на дорогах.

Список литературы

1. Евтюков С.С., Голов Е.В. Аудит безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах регионального значения в Ленинградской области // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 85-89. URL: <https://www.usurt.ru/transporturala/rus/magazines> (дата обращения: 19.05.2025).
2. Кочетков В.А. Проблема и перспектива внедрения системы автоматического весогабаритного контроля // Теория и практика современной науки. 2019. № 9 (51). С. 6. URL: <https://www.modern-j.ru/> (дата обращения: 19.05.2025).
3. Голов Е.В. Фактор скорости в системе безопасности дорожного движения // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 139-148. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-139-148. EDN: EABWMV. URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/archive/2021-06> (дата обращения: 19.05.2025).
4. Куракина Е.В., Рязанов С.В. Комплексный анализ аварийности и причин ухудшения дорожно-транспортной обстановки // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 189-196. URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/> (дата обращения: 28.05.2025).
5. Куракина Е.В., Кравченко П.А. Метод оценки состояния целевых показателей и индикаторов в системе безопасности дорожного движения // Грузовик. 2024. № 6. С. 35-38. URL: https://www.mashin.ru/eshop/journals/gruzovik_stroitel-no-dorozhnye_mashiny_avtobus_trollejbus_tramvaj/2031/18/ (дата обращения: 28.05.2025).
6. ПНСТ 663-2022. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Дороги автомобильные общего пользования. Пункты весового и габаритного контроля транспортных средств автоматические. Требования к проектированию. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. 28 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200189300> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Ярьско В.А. Безопасность дорожного движения // Вестник магистратуры. 2019. № 3-2 (90). С. 59-65. URL: <https://www.magisterjournal.ru> (дата обращения: 20.05.2025).
8. Сорокина Е.В., Голов Е.В., Евтюков С.С. Специфика образования факторов риска ДТП в подсистеме «автомобильная дорога» // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 1-3 (84). С. 82-93. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-82-93. EDN: KEKOIG. URL: <https://oreluniver.ru/science/journal/mtitm> (дата обращения: 19.05.2025).
9. Сорокина Е.В., Голов Е.В., Евтюков С.С. Интегральная оценка состояния безопасности дорожного движения регионального уровня (на примере удмуртской республики). // Транспорт Урала. 2025. № 1 (84). С. 89-96. URL: <https://www.usurt.ru/transporturala/rus/magazines> (дата обращения: 28.05.2025).

УДК 656.1

ПРАВОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛНЕНИЯ НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫХ АКТОВ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Голов Е.В., Черкашин С.Н., Петров С.В.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, e-mail: ippetrovsv@inbox.ru*

Особое значение проблема исполнения нормативно-правовых актов приобретает в связи с тем, что автомобильный транспорт является самым массовым и доступным видом перевозок. Цель исследования: проанализировать нормативно-правовую базу, выявить проблемы правоприменения и разработать предложения по совершенствованию механизмов обеспечения транспортной безопасности. Проанализированы несколько десятков нормативно-правовых актов. Несмотря на наличие детализированного законодательного регулирования, система имеет серьезные недостатки, которые значительно снижают её эффективность. Выделены несколько ключевых проблем в действующей правовой системе. Во-первых, это несовершенство нормативной базы, особенно в сфере автомобильного транспорта, где наблюдается правовая неопределенность и несоответствие современным вызовам, таким как кибератаки. Во-вторых, проблемы категорирования объектов и формальный подход к разработке планов обеспечения безопасности приводят к недостаточной защите объектов. В-третьих, низкий уровень ответственности должностных лиц и бизнеса затрудняет реализацию предусмотренных мер. Для реформирования существующей системы необходимо оптимизировать законодательство, унифицировать требования, улучшить систему категорирования объектов и повысить качество планирования безопасности. Ключевая идея данного исследования заключается в том, что для создания эффективной системы транспортной безопасности требуется комплексный подход, который бы учитывал не только существующие нормативные акты, но и современные угрозы.

Ключевые слова: транспортная безопасность, автомобильный транспорт, автомобильная дорога, эксплуатация автомобильных дорог, безопасность дорожного движения

LEGAL FEATURES OF THE EXECUTION OF REGULATORY LEGAL ACTS IN THE FIELD OF TRANSPORT SAFETY

Golov E.V., Cherkashin S.N., Petrov S.V.

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, e-mail: ippetrovsv@inbox.ru*

Of particular importance is the problem of enforcement of regulatory legal acts due to the fact that road transport is the most widespread and affordable type of transportation. The purpose of the study is to analyze the regulatory framework, identify problems of law enforcement and develop proposals for improvement mechanisms for ensuring transport security. Several dozens of regulatory legal acts have been analyzed. Despite the existence of detailed legislative regulation, the system has serious drawbacks that significantly reduce its effectiveness. Several key problems in the current legal system are highlighted. First, there is the imperfection of the regulatory framework, especially in the field of road transport, where there is legal uncertainty and inconsistency with modern challenges such as cyber-attacks. Secondly, the problems of categorizing objects and the formal approach to developing security plans lead to insufficient protection of objects. Thirdly, the low level of responsibility of officials and businesses makes it difficult to implement the envisaged measures. To reform the existing system, it is necessary to optimize legislation, unify requirements, improve the object categorization system and improve the quality of security planning. The key idea of this study is that in order to create an effective transport security system, an integrated approach is required that would take into account not only existing regulations, but also modern threats.

Keywords: transport safety, road transport, highway, road maintenance, road safety

Введение

Актуальность темы обусловлена возрастающими угрозами безопасности на автомобильном транспорте, включая террористические риски, хищения грузов и дорожно-транспортные происшествия с тяжелыми последствиями. Автомобильный транспорт, являясь наиболее массовым и доступным видом перевозок, требует особого внимания в части правового регулирования безопасности.

Цель исследования – изучение существующих нормативных правовых актов, выявление сложностей в их применении и формирование рекомендаций по улучшению системы обеспечения транспортной безопасности на объектах инфраструктуры и транспортных средствах.

Материалы и методы исследования

На текущий момент разработаны и приняты несколько десятков нормативно-правовых актов.

Основополагающим в области транспортной безопасности является Федеральный закон от 09.02.2007 № 16-ФЗ «О транспортной безопасности», содержащий основные положения и понятия в данной сфере [1].

Указ Президента РФ от 31.03.2010 № 403 «О создании комплексной системы обеспечения безопасности населения на транспорте» охватывает обеспечение безопасности населения на общественном транспорте [2].

В соответствии со статьей 8 Федерального закона № 16-ФЗ Правительством Российской Федерации установлены обязательные требования в области автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта, в области дорожного хозяйства и для всех видов транспорта [1].

Результаты исследования и их обсуждение

Каждый элемент нормативной базы тщательно прорабатывает конкретные аспекты безопасности, создавая тем самым комплексную и всестороннюю правовую основу для защиты транспортного комплекса. Все нормативные акты тесно взаимодействуют между собой, формируя единый механизм контроля и обеспечения безопасности на всех видах транспорта.

Такая структурированная система позволяет охватить все необходимые аспекты защиты транспортной инфраструктуры, обеспечивая её надёжную и эффективную работу в условиях современных угроз и вызовов [3].

Прежде всего, следует отметить, что нормативная база охватывает как общие требования, применяемые ко всем видам объектов транспортной инфраструктуры, так и специальные положения, учитывающие особенности конкретных типов транспортных средств и сооружений. В частности, законодательство устанавливает дифференцированные подходы к обеспечению безопасности для автовокзалов, автостанций, грузовых терминалов, парковок тяжеловесного транспорта и иных объектов автомобильной инфраструктуры.

В нормативно-правовой базе значительное внимание уделяется регламентации внутренних организационно-распорядительных документов субъектов транспортной инфраструктуры. Обязательным требованием является создание и регулярная актуализация следующего пакета документации:

- планы обеспечения транспортной безопасности (ПОТБ);
- инструкции по действиям персонала при возникновении угроз незаконно-го вмешательства;
- регламенты взаимодействия с правоохранительными структурами;

– положения о пропускном и внутриобъектовом режимах;

– журналы учета и отчетности по вопросам безопасности.

Все эти документы должны постоянно обновляться в соответствии с изменяющимися требованиями законодательства и актуальными угрозами безопасности, что обеспечивает эффективную работу системы транспортной безопасности.

При этом законодатель устанавливает жесткие требования не только к наличию указанных документов, но и к их содержанию, срокам разработки и порядку согласования с уполномоченными органами. Например, планы обеспечения транспортной безопасности должны включать не менее 15 обязательных разделов, содержащих детализированные мероприятия по противодействию всем возможным видам угроз.

Отдельный блок нормативных требований посвящен правилам взаимодействия субъектов транспортной инфраструктуры с федеральными органами исполнительной власти. Эти положения охватывают:

- порядок информационного обмена;
- алгоритмы совместных действий при возникновении угроз;
- процедуры проведения проверок и контроля;
- формы предоставления отчетности;
- механизмы оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации.

Особенно детализированы требования по оснащению объектов транспортной инфраструктуры инженерно-техническими средствами охраны, контроля и досмотра. Нормативные акты содержат исчерпывающие перечни необходимого оборудования с указанием:

- технических характеристик и функциональных возможностей;
- требований к местам установки и зонам покрытия;
- правил эксплуатации и технического обслуживания;
- параметров резервирования и дублирования систем;
- стандартов интеграции с другими системами безопасности.

При этом для различных категорий объектов устанавливаются дифференцированные требования по комплектации техническими средствами. Например, объекты первой категории должны быть оснащены многоуровневой системой контроля доступа с биометрической идентификацией, тогда как для объектов третьей категории допускается использование упрощенных систем.

Таким образом, действующая система нормативно-правового регулирования представляет собой комплексный, детализированный механизм, охватывающий все аспекты обеспечения транспортной безопасности – от организационных вопросов до технического оснащения объектов. Однако, как показывает практика, эффективность реализации этих требований во многом зависит от качества правоприменения и уровня координации между всеми участниками процесса обеспечения транспортной безопасности.

Данные требования обязательны для исполнения субъектами транспортной инфраструктуры, которыми являются:

- субъекты транспортной инфраструктуры (юридические лица, индивидуальные предприниматели и физические лица, являющиеся собственниками объектов транспортной инфраструктуры и (или) транспортных средств или использующие их на ином законном основании);

- субъекты транспортной инфраструктуры и (или) перевозчики (в том числе иностранных государств), осуществляющие перевозки из пункта отправления в пункт назначения, расположенные на территории Российской Федерации (каботаж);

- субъекты транспортной инфраструктуры и (или) перевозчики иностранных государств, осуществляющие перевозки в Российскую Федерацию, из Российской Федерации, через территорию Российской Федерации;

- застройщики объектов транспортной инфраструктуры.

На основании «руководства по соблюдению обязательных требований, установленных законодательством Российской Федерации в области транспортной безопасности, в части оснащения техническими средствами обеспечения транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств», утвержденными Федеральной службой по надзору в сфере транспорта от 20.06.2022, были определены основные нарушения действующих нормативно-правовых актов [4]:

- в области автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта. При осуществлении регулярных автомобильных перевозок пассажиров и багажа в международном сообщении и по межрегиональным маршрутам транспортные средства не оснащаются техническими средствами видеонаблюдения и видеозаписи в пассажирском салоне и в кабине управления транспортным средством;

- в области дорожного хозяйства. На объектах транспортной инфраструктуры I, II и III категорий не создаются помещения

или участки помещений для управления техническими средствами и силами обеспечения транспортной безопасности, при этом единый пункт управления обеспечения транспортной безопасности для нескольких объектов транспортной инфраструктуры в субъекте транспортной инфраструктуры также не создан.

В процессе контроля деятельности субъектов транспортной инфраструктуры регулярно фиксируются серьезные нарушения, связанные с назначением ответственных лиц. Зачастую сотрудники приступают к выполнению своих обязанностей без прохождения обязательного обучения и необходимой аттестации по установленным программам подготовки. Кроме того, систематически нарушаются регламентированные сроки проведения оценки уязвимости объектов, включая дополнительную оценку, а также сроки разработки планов обеспечения транспортной безопасности. Нередки случаи несоблюдения установленных сроков реализации мероприятий, предусмотренных в этих планах.

Проведенное исследование указывает на необходимость дальнейшего развития и модернизации существующих механизмов правового регулирования в данной сфере.

1. Несовершенство нормативной базы

- В отличие от строго регламентированных авиационных и железнодорожных перевозок, сфера автомобильного транспорта остается недостаточно урегулированной на законодательном уровне. Это создает значительные сложности для участников рынка, вынужденных действовать в условиях правовой неопределенности.

- Наблюдается явная диспропорция между федеральным и региональным регулированием, когда субъекты Федерации зачастую вынуждены самостоятельно восполнять пробелы федерального законодательства, что приводит к возникновению противоречивых норм и требований.

- Особую озабоченность вызывает отставание нормативной базы от современных технологических угроз (кибератаки, дроны и др.). В эпоху цифровой трансформации традиционные подходы к обеспечению безопасности уже не могут гарантировать должный уровень защиты.

2. Проблемы категорирования объектов

- Отсутствие четких, научно обоснованных критериев приводит к субъективизму при отнесении объектов к той или иной категории опасности. На практике это означает, что одинаковые по своим характеристикам объекты могут получать разную категорию в зависимости от субъективного мнения проверяющих [5].

– Особенно остро эта проблема стоит для малых и средних объектов транспортной инфраструктуры, которые зачастую вообще выпадают из системы категорирования, создавая тем самым «серые зоны» в обеспечении безопасности [6].

3. Упрощенный подход к формированию планов обеспечения транспортной безопасности

– Создаваемые документы по обеспечению транспортной безопасности зачастую носят формальный характер, копируя типовые решения без учета специфики конкретного объекта. Такой подход сводит на нет саму идею превентивных мер безопасности.

– Отсутствие системы регулярного обновления и актуализации планов приводит к тому, что они быстро устаревают и перестают соответствовать реальным угрозам.

4. Низкий уровень ответственности, особенно для крупного бизнеса

– Штрафы начинаются от сорока тысяч рублей и заканчиваются полумиллионом при доказанном умышленном нарушении требований, что на данный момент недостижимо.

– Уголовная ответственность для субъекта инфраструктуры наступает только при гибели людей при условии умышленного невыполнения требований по обеспечению безопасности.

Данные проблемы приводят к задержкам реализации требований на многих объектах инфраструктуры, что в свою очередь повышает риски и уязвимость данных объектов, приводит к финансовым потерям, росту числа инцидентов и правонарушений и снижению доверия к системе транспортной безопасности. При этом рост проблем имеет кумулятивный эффект и приводит к целому ряду серьезных негативных последствий [7].

Во-первых, возникают значительные задержки во внедрении обязательных мер безопасности. На практике это означает, что объекты транспортной инфраструктуры длительное время остаются недостаточно защищенными, создавая потенциальные угрозы для пассажиров, грузов и окружающей среды [8].

Во-вторых, повышается общая уязвимость транспортной системы. В условиях современных вызовов это создает реальные риски для национальной безопасности страны, учитывая стратегическое значение автомобильного транспорта в экономике.

В-третьих, фиксируется устойчивый рост числа инцидентов и связанных с ними финансовых потерь. По экспертным оценкам, ежегодный ущерб от недостатков в си-

стеме транспортной безопасности исчисляется миллиардами рублей [9].

В-четвертых, снижается доверие как к самой системе транспортной безопасности, так и к органам, осуществляющим контроль в этой сфере. Это подрывает авторитет государства в глазах бизнес-сообщества и населения.

Для решения этих проблем требуется комплекс мер – от совершенствования законодательства до повышения эффективности контроля.

В частности:

1. Оптимизация и корректировка нормативной базы

– Детализация требований к различным типам перевозок, учитывающая и оснащение техническими средствами, и соблюдение норм охраны (снижение правовой нагрузки на субъекты инфраструктуры).

– Необходима разработка специализированного отраслевого регламента для автомобильных перевозок, который бы учитывал их специфику. Этот документ должен стать своего рода ключевым документом для всех участников рынка.

– Особое внимание следует уделить гармонизации федеральных и региональных требований, создав четкую вертикаль регулирования без противоречий и дублирования.

– Рекомендуется применять дифференцированный подход к определению нормативной нагрузки с учетом категории объекта, что имеет особое значение для субъектов малого и среднего бизнеса.

2. Стандартизация требований

– Формирование общефедеральных нормативов оборудования объектов.

– Разработка типовых инструкций для различных классов объектов.

3. Совершенствование системы категорирования

– Требуется разработка научно обоснованных критериев оценки, включая:

▪ для крупных транспортных узлов – комплексные показатели интенсивности пассажиропотока и грузооборота;

▪ для малых объектов – оценку их значимости в региональной транспортной системе.

– Необходимо создать прозрачную балльную систему классификации, исключающую субъективный подход.

4. Коренное улучшение качества планирования безопасности

– Следует разработать подробные методические рекомендации по адаптации типовых решений к конкретным условиям.

– Ввести обязательную процедуру ежегодного комплексного аудита всех документов по безопасности.

– Создать современные электронные шаблоны с модульным принципом построения [10].

– Существенное снижение административной нагрузки.

– Реализовать принцип «регуляторной гильотины» для устаревших и избыточных норм.

– Активно внедрять системы электронного документооборота и межведомственного взаимодействия.

– Разработать специальные упрощенные процедуры для малого бизнеса.

Реализация предложенного комплекса мер позволит достичь следующих значимых результатов:

1. Существенное (на 25-30%) сокращение сроков внедрения мер безопасности за счет устранения административных барьеров и оптимизации процедур.

2. Заметное уменьшение количества нормативных нарушений (на 40-45%) благодаря четким и понятным правилам игры для всех участников рынка.

3. Качественное повышение уровня защищенности объектов транспортной инфраструктуры (на 50-60%) через внедрение современных систем безопасности.

4. Значительное сокращение административных издержек бизнеса (на 15-20%) за счет оптимизации контрольных процедур и внедрения цифровых технологий.

5. Формирование прозрачной, понятной и эффективной системы регулирования, пользующейся доверием всех заинтересованных сторон.

Для успешной реализации предложенных мер необходимо:

– обеспечить тесное взаимодействие законодательных и исполнительных органов власти;

– активно вовлекать профессиональное сообщество в процесс реформирования;

– реализовывать изменения поэтапно с обязательным мониторингом эффективности;

– обеспечить достаточное финансирование преобразований;

– проводить регулярную оценку достигнутых результатов.

Лишь целостное, структурированное решение способно обеспечить надежную защиту транспортной инфраструктуры от существующих угроз и вызовов современности.

Заключение

Значительным препятствием в обеспечении транспортной безопасности выступает отсутствие системного подхода и согласованности в действиях различных структур, ответственных за её поддержание. Дан-

ная несогласованность порождает слабые звенья в общей системе безопасности, которые становятся приоритетными объектами для преступных элементов. Помимо этого, на эффективность обеспечения транспортной безопасности негативно влияют сложные военно-политические и экономические факторы, с которыми сталкивается страна.

Система транспортной безопасности Российской Федерации характеризуется как комплексный социально-правовой механизм, обладающий существенными региональными особенностями. Эти особенности формируются исходя из стратегического значения и геополитического расположения отдельных субъектов страны. При этом степень и характер потенциальных угроз в сфере транспортной безопасности коррелируют с демографической плотностью региона, уровнем развития транспортной инфраструктуры и общей длиной транспортных магистралей в пределах конкретного федерального округа.

В системе обеспечения транспортной безопасности участвует множество субъектов, среди которых особое место занимают органы внутренних дел. Их ключевая и системообразующая роль обусловлена тем, что сфера транспортной безопасности пересекается с компетенциями и предназначением полиции, закрепленными законодательно.

Все эти особенности требуют глубокого теоретико-правового осмысления данного феномена и разработки эффективных механизмов обеспечения устойчивости транспортной безопасности в современной России.

Список литературы

1. Федеральный закон от 09.02.2007 N 16-ФЗ «О транспортной безопасности» (с изменениями и дополнениями) // СПС Консультант плюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069/ (дата обращения: 30.05.2025).

2. Указ президента РФ от 31.03.2010 N 403 «О создании комплексной системы обеспечения безопасности населения на транспорте» (с изменениями и дополнениями) // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/197837/> (дата обращения: 30.05.2025).

3. Сорокина Е.В., Шпет В.В., Гончарова Я.Д., Голов Е.В. Многомерный анализ распределения дорожно-транспортных происшествий на дорожной сети Ленинградской // Транспортное дело России. 2023. № 1. С. 294-297. DOI: 10.52375/20728689_2023_1_297. EDN: QBZORD. URL: <https://morvesti.ru/izdaniya/tdr/> (дата обращения: 19.05.2025).

4. «Руководство по соблюдению обязательных требований, установленных законодательством российской федерации в области транспортной безопасности, в части оснащения техническими средствами обеспечения транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств», утвержденные Федеральной службой по надзору в сфере транспорта от 20.06.2022 // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/405872427/> (дата обращения: 30.05.2025).

5. Куракина Е.В., Рязанов С.В. Комплексный анализ аварийности и причин ухудшения дорожно-транспортной обстановки // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 189-196. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-189-196. EDN: BDBBFF. URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/archive/2020-08> (дата обращения: 30.05.2025).
6. Астраханцев И.В. Транспортная безопасность современного государства как социоюридический феномен // Вестник Московского университета МВД России. 2024. № 3. С. 23. URL: <http://mosumvd.com/izdatelskaya-deyatelnost/periodicheskie-izdaniya/vestnik-moskovskogo-universiteta-mvd-rossii/> (дата обращения: 19.05.2025).
7. Шпет В.Р., Голов Е.В. Анализ факторов, влияющих на возникновение дорожно-транспортных происшествий с наездом на пешеходов при их посадке и высадке из трамваев, по городу Санкт-Петербург // Транспортное дело России. 2024. № 3. С. 214-217. EDN: ZHZOFU. URL: <https://morvesti.ru/izdaniya/tdr/> (дата обращения: 19.05.2025).
8. Куракина Е.В. Безопасное поведение водителей транспортных средств с целью снижения ДТП (на примере Санкт-Петербурга и Ленинградской области) // Вестник Тульского государственного университета. №1 Социальные и гуманитарные науки. 2014. № 1 (20). С. 148-155. EDN: RZ-CIZR. URL: <https://vestnik.tvsu.ru/index.php/social-humanitarian/issue/archive> (дата обращения: 30.05.2025).
9. Петров А.И. Динамика и прогноз обеспечения безопасности дорожного движения в России до 2030 г. // Проблемы прогнозирования. 2024. № 5 (206). С. 152-164. DOI: 10.47711/0868-6351-206-152-164. EDN: DYSJYY. URL: <https://ecfor.ru/nauchnye-izdaniya/problemy-prognozirovaniya/arhiv-nomerov/problemy-prognozirovaniya-2024-5/> (дата обращения: 30.05.2025).
10. Печатнова Е.В., Нечаев К.С. Факторы формирования аварийно-опасных участков на автомобильных дорогах федерального значения // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20. № 1 (89). С. 92-101. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-1-92-101. EDN: HFGKBJ. URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/issue/view/49/showToc> (дата обращения: 30.05.2025).

СТАТЬЯ

УДК 544.4:546

**РАЗЛОЖЕНИЕ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА
В ПРИСУТСТВИИ СЕРЕБРЯНОГО КАТАЛИЗАТОРА**

Камбарова Г.Б., Ли С.П., Худайбергенова Э.М., Жоробекова Ш.Ж.

*Институт химии и фитотехнологий Национальной академии наук Кыргызской Республики,
Бишкек, e-mail: gulnara_kambarova@mail.ru*

Одним из широко используемых на практике окислителей является пероксид водорода. По сравнению с другими окислителями пероксид водорода обладает рядом преимуществ: он вступает в различные реакции окисления и восстановления, разлагается с образованием кислорода и воды. В обычных условиях происходит медленное спонтанное разложение: $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$. Высокую скорость окисления загрязнителей пероксидом водорода можно обеспечить при использовании катализаторов процесса его разложения. Одним из эффективных катализаторов для разложения пероксида водорода является серебро. Цель работы – изучить кинетику разложения пероксида водорода в водной среде при различных температурах, значениях pH среды в присутствии катализатора, синтезированного пропиткой угля раствором соли серебра. Остаточная концентрация пероксида водорода определена йодометрическим методом. Текстура поверхности серебряного катализатора и его элементный состав изучены сканирующей электронной микроскопией. Изучение кинетики протекающих при этом процессов позволяет выяснить механизм реакций и возможность управления процессом. Рассчитаны константы скорости реакции процесса разложения пероксида водорода. Описана морфология испытанного катализатора, облегчающая образование промежуточного активированного комплекса с участием серебра, координационных центров угля и молекул пероксида водорода. Для описания механизма процесса, протекающего с участием катализатора, могут быть использованы различные подходы. Авторами исследуемый катализатор рассмотрен в качестве модели ферментов и для кинетических расчетов использована схема Михаэлиса – Ментен. Установлено, что, согласно уравнению Михаэлиса – Ментен и графическому изображению его в координатах Хилла, в рассматриваемой реакции реализуется механизм каталитического разложения пероксида водорода, включающий образование промежуточного активированного комплекса с участием дробного числа молекул субстрата. Исследования выявили, что скорость разложения пероксида водорода нелинейно зависит от концентрации ионов серебра, достигая своего максимального значения при определенной концентрации, после чего она начинает уменьшаться.

Ключевые слова: катализатор, кинетика, пероксид водорода, уравнение Михаэлиса – Ментен, координаты Хилла

**DECOMPOSITION OF HYDROGEN PEROXIDE
IN THE PRESENCE OF A SILVER CATALYST**

Kambarova G.B., Li S.P., Khudaybergenova E.M., Zhorobekova Sh.Zh.

*Institute of chemistry and phytotechnology of the National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic,
Bishkek, e-mail: gulnara_kambarova@mail.ru*

One of the oxidizing agents widely used in practice is hydrogen peroxide. Compared with other oxidizing agents, hydrogen peroxide has several advantages: it enters into various oxidation and reduction reactions, decomposes to form oxygen and water. Under normal conditions, slow spontaneous decomposition occurs: $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$. A high rate of oxidation of pollutants by hydrogen peroxide can be achieved by using catalysts for its decomposition. Silver is one of the most effective catalysts for the decomposition of hydrogen peroxide. The aim of the work: to study the kinetics of hydrogen peroxide decomposition in an aqueous medium at different temperatures, pH values of the medium in the presence of a catalyst synthesized by impregnating carbon with a silver salt solution. The residual concentration of hydrogen peroxide was determined by the iodometric method. The surface texture of the silver catalyst and its elemental composition were studied by scanning electron microscopy. Studying the kinetics of the processes involved in this process makes it possible to clarify the mechanism of reactions and the possibility of controlling the process. The reaction rate constants of the hydrogen peroxide decomposition process are calculated. The morphology of the tested catalyst is described, facilitating the formation of an intermediate activated complex involving silver, coal coordination centers, and hydrogen peroxide molecules. Various approaches can be used to describe the mechanism of the process involving a catalyst. The authors considered the studied catalyst as a model of enzymes and used the Michaelis-Menten scheme for kinetic calculations. It has been established that according to the Michaelis-Menten equation and its graphical representation in Hill coordinates, the reaction under consideration implements a mechanism of catalytic decomposition of hydrogen peroxide, including the formation of an intermediate activated complex involving a fractional number of substrate molecules. Studies have revealed that the decomposition rate of hydrogen peroxide depends non-linearly on the concentration of silver ions, reaching its maximum value at a specific concentration, after which it begins to decrease.

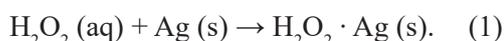
Keywords: catalyst, kinetics, hydrogen peroxide, Michaelis – Menten equation, Hill coordinates

Введение

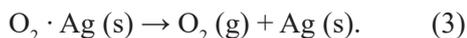
Одним из широко используемых на практике окислителей является пероксид водорода. Его часто применяют в качестве отбеливателя, антисептика, гидрирующего агента, а также для очистки сточных вод [1]. По сравнению с другими окислителями пероксид водорода обладает рядом преимуществ: он вступает в различные реакции окисления и восстановления, разлагается с образованием кислорода и воды. В отсутствие катализаторов происходит медленное спонтанное разложение:



Высокую скорость окисления загрязнителей пероксидом водорода можно обеспечить при использовании катализаторов процесса его разложения [3; 4]. Одним из эффективных катализаторов для разложения пероксида водорода является серебро [5]. Реакция разложения протекает на поверхности катализатора. Вначале молекулы пероксида водорода адсорбируются на активных центрах поверхности серебра, а затем адсорбированный пероксид водорода подвергается разложению. Адсорбция пероксида водорода протекает по следующей схеме [6]:



На поверхности происходят следующие превращения:



Образовавшаяся вода остается в жидкой фазе, а кислород десорбируется с поверхности катализатора в газовую фазу.

Особое значение имеет изучение кинетики протекающих при этом процессов, поскольку это позволяет выяснить механизм реакций и возможность управления процессом. Для описания механизма процесса, протекающего с участием катализатора, могут быть использованы различные подхо-

ды [7]. Катализаторы можно рассматривать в качестве моделей ферментов [8].

Цель исследования – изучить кинетику разложения пероксида водорода в водной среде при различных температурах, значениях pH среды в присутствии катализатора, синтезированного пропиткой угля раствором соли серебра (Ag-Y).

Материалы и методы исследования

Синтез и свойства полученного катализатора подробно описаны одним из авторов ранее [9]. Проанализировано временное изменение концентрации пероксида водорода в растворах с фиксированной начальной концентрацией равной 170 мг/л при разных значениях pH и температуры. Кислую среду создавали добавлением соляной кислоты в раствор, щелочную – гидроксидом натрия. Контроль вели по показаниям pH-метра. Реакцию проводили в термостатируемой установке при 50–90 °С.

По окончании времени реакции (10–60 мин) остаточную концентрацию пероксида водорода в растворе определяли общеизвестным йодометрическим методом [10, с. 49].

СЭМ проводили на приборе TESCAN Vega 3 LMN, оборудованным энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором Oxford X-ACT с программным обеспечением Oxford AZtec Energy. Качественный и количественный энергодисперсионный химический анализ проводился в режимах сканирования Point-ID (точечное сканирование).

Результаты исследования и их обсуждение

Пероксид водорода при комнатной температуре без катализатора разлагается очень медленно: например, за первые 10 мин скорость его разложения равна $0,70 \cdot 10^{-5}$ моль/лсг (табл. 1).

Присутствие серебряного катализатора ускоряет реакцию разложения пероксида водорода (табл. 2).

Таблица 1

Кинетические данные по разложению пероксида водорода

t, мин	$[\text{H}_2\text{O}_2] \cdot 10^{-3}$, моль/л	$V \cdot 10^{-5}$, моль/лсг	$m \cdot 10^3$, моль/л
10	4,58	0,70	0,46
20	4,26	0,53	0,43
30	4,10	0,27	0,41
40	4,00	0,17	0,40
50	3,95	0,08	0,39
60	3,92	0,05	0,39

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Кинетические данные по разложению пероксида водорода в присутствии катализатора Ag-Y ($t = 25^\circ\text{C}$, $m_{\text{кат}} = 0,1 \text{ г}$)

t, мин	$[\text{H}_2\text{O}_2] \cdot 10^{-3}$, моль/л	$1/[\text{H}_2\text{O}_2] \cdot 10^{-3}$, л/моль	$V \cdot 10^{-5}$, моль/лсг	$m \cdot 10^3$, моль/л
10	2,49	0,40	5,85	0,25
20	2,28	0,44	0,35	0,23
30	2,14	0,48	0,23	0,21
40	2,00	0,50	0,23	0,20
50	1,87	0,53	0,22	0,19
60	1,77	0,56	0,17	0,18

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

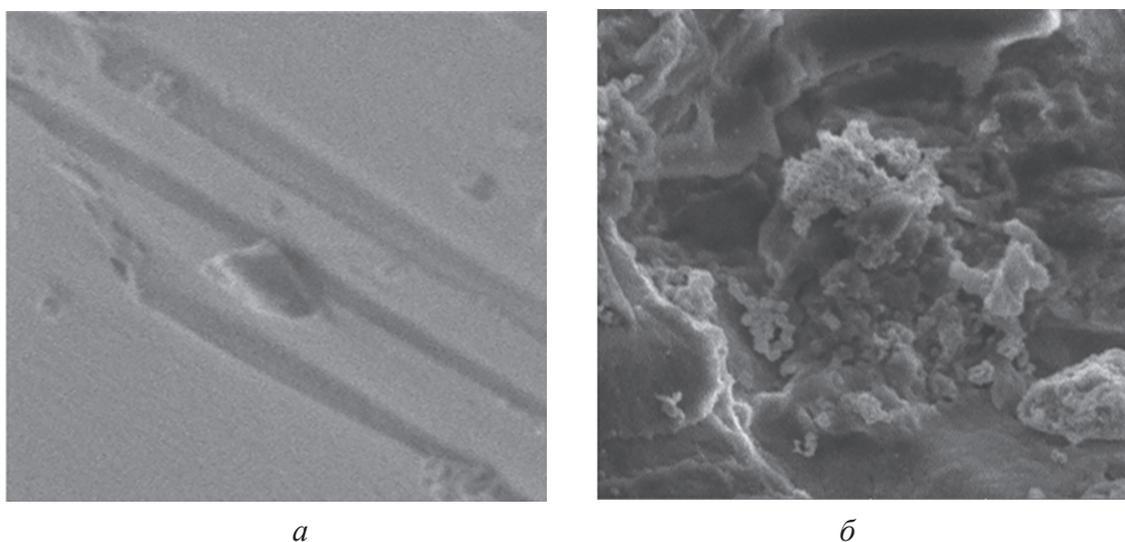


Рис. 1. Микрофотографии СЭМ: а – исходный уголь, б – Ag-Y
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Для описания механизма процесса, протекающего с участием катализатора, могут быть использованы различные подходы. Катализаторы можно рассматривать в качестве модели ферментов [8]. Предполагается, что реакция разложения пероксида водорода в присутствии серебряного катализатора протекает через образование промежуточного комплекса между реагентом и катализатором [11].

На активность катализатора оказывает существенное влияние его морфология.

Снимки СЭМ полученных образцов показывают наличие пористой структуры. Образец исходного угля (рис. 1, а) имеет плотную поверхностную структуру. Текстура поверхности серебряных катализаторов (рис. 1, б) состоит из плотно сросшихся глобул, между которыми просматриваются пустоты, образующие бугристую текстуру поверхности.

Как было отмечено в работе [9], серебро на поверхности катализатора имеет кристаллическую структуру. Описанная здесь морфология нанесенного катализатора облегчает формирование промежуточных активированных комплексов с молекулами субстрата. Увеличение скорости реакции разложения H_2O_2 с ростом его концентрации объясняется увеличением частоты эффективных столкновений между молекулами пероксида водорода и активными центрами катализатора Ag-Y, что и приводит к значительному ускорению процесса (рис. 2).

О каталитической активности катализатора можно судить по константе Михаэлиса, которая выражает сродство катализатора к субстрату [12]. Чем меньше константа Михаэлиса, тем выше активность катализатора и тем интенсивнее будет протекать каталитиз (табл. 3).

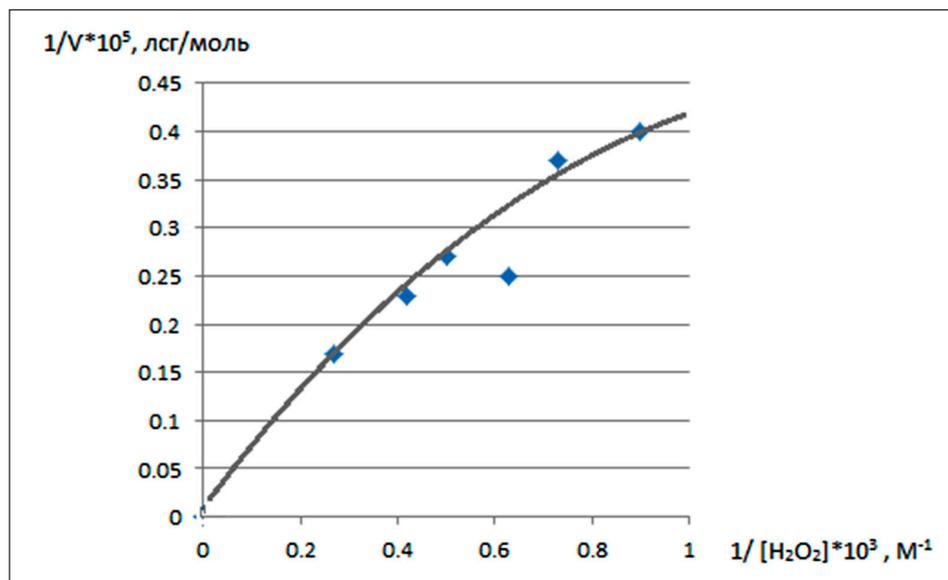


Рис. 2. Зависимость скорости разложения пероксида водорода от его концентрации по схеме Михаэлиса – Ментен в присутствии Ag-Y
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

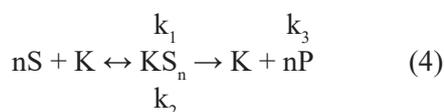
Таблица 3

Значения констант скорости реакции и Михаэлиса разложения пероксида водорода в присутствии катализатора Ag-Y при разных температурах

T, °C	$K \cdot 10^{-3}, 1/c$	$V_m \cdot 10^{-4}, \text{моль/лсг}$	$K_m \cdot 10^{-4}$
25	1,77	2,0	1,4
35	2,50	2,5	1,1
45	3,16	3,3	1,9

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для описания изучаемого процесса выбрана общая модель, которая предполагает связывание с катализатором «n» молекул субстрата и описывается следующей схемой [13]:



Согласно схеме Михаэлиса – Ментен скорость реакции в данном случае выражается следующим уравнением:

$$V = V_m [S]^n / K_m + [S]^n \quad (5)$$

При дальнейшей трансформации данного выражения

$$V = V_m [S]^n / K_m + [S]^n; \quad (6)$$

$$V K_m + V [S]^n = V_m [S]^n; \quad (7)$$

$$V K_m = V_m [S]^n - V [S]^n; \quad (8)$$

$$V K_m = [S]^n (V_m - V); \quad (9)$$

$$V / (V_m - V) = [S]^n / K_m \quad (10)$$

получаем следующее уравнение

$$\lg (V / V_m - V) = n \lg S - \lg K_m, \quad (11)$$

позволяющее определить значение «n» по наклону прямой зависимости $\lg (V / V_m - V)$ от $\lg [S]$ в координатах Хилла [14].

Результаты исследований показали, что «n» имеет дробное значение (рис. 3). Это может быть объяснено одновременным связыванием молекул субстрата с активными центрами катализатора при формировании промежуточного активированного комплекса. Образующиеся при этом координационные узлы представляются неоднородными, то есть могут включать как одну, так и две молекулы субстрата. Возможно также, что связывание одной молекулы субстрата влияет на эффективность связывания другой.

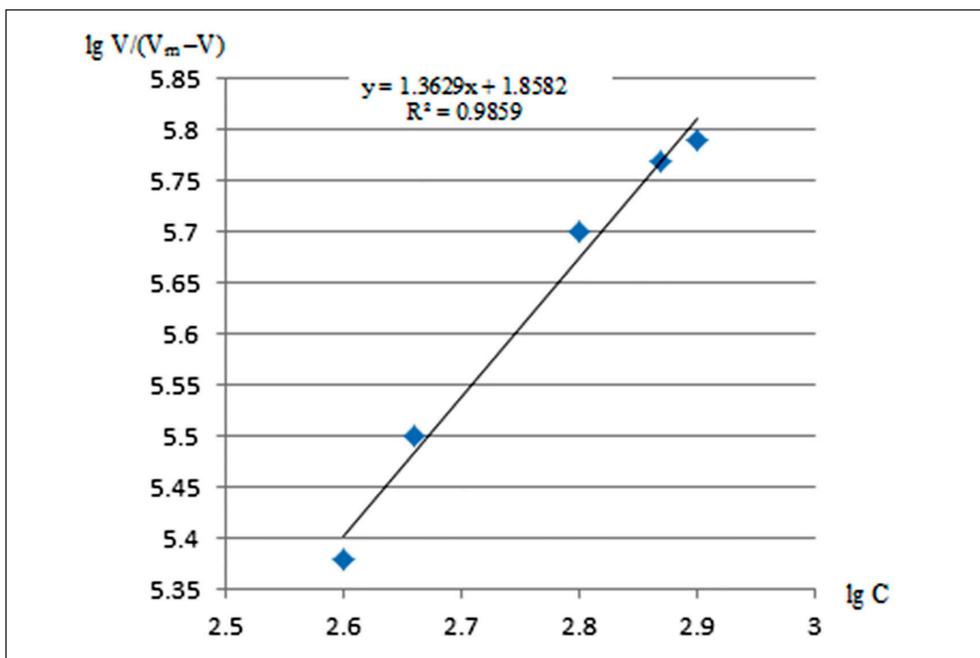


Рис. 3. Зависимость скорости разложения пероксида водорода от его концентрации в координатах Хилла в присутствии катализатора Ag-Y
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

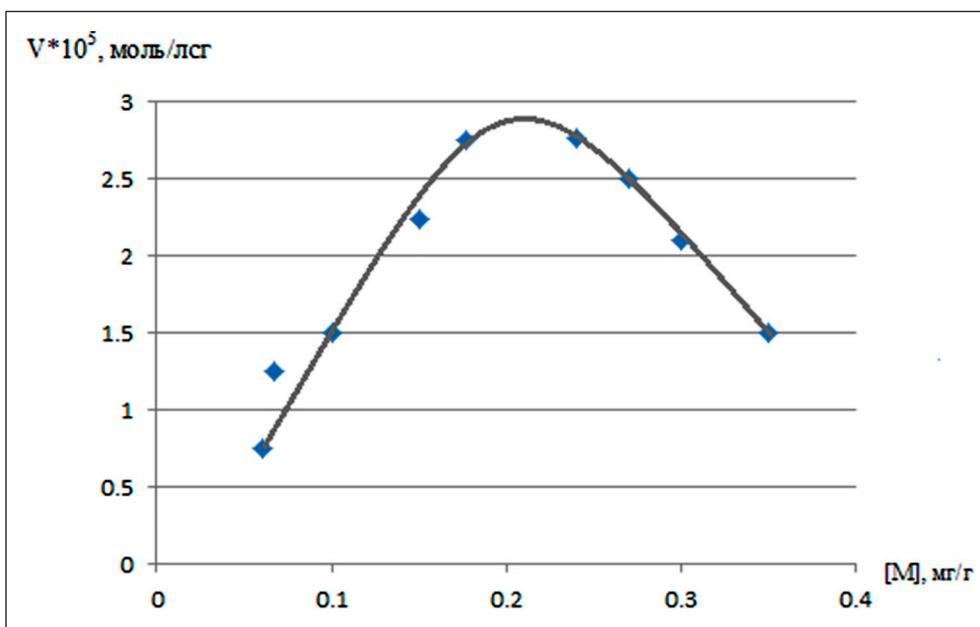


Рис. 4. Зависимость скорости разложения пероксида водорода от содержания металла в фазе Ag-Y
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Состав координационных узлов, образующихся в катализаторе при разных концентрациях иона металла, оказывает влияние на формирование в процессе реакции промежуточного активированного комплекса

и, следовательно, на каталитическую активность. Как показано на рис. 4, зависимость скорости разложения пероксида водорода от концентрации ионов металла проходит через экстремум.

Вероятно, что в области небольших концентраций серебра в фазе катализатора формирование промежуточных активированных комплексов облегчено за счет участия более устойчивых координационных узлов, образующихся при вовлечении в процесс комплексообразования наиболее доступных лигандных групп катализатора [15]. Повышение скорости реакции, соответствующее последующему интервалу увеличения содержания ионов металлов в катализаторе, следует отнести к увеличению каталитически активных центров в реакционной системе. Однако при дальнейшем увеличении содержания ионов металла в массе катализатора происходит их диффузия вглубь матрицы угля. При этом насыщенность координационной сферы ионов металла лигандными группами катализатора увеличивается. Как следствие, возрастает конкурентность координационных центров по лигандным группам катализатора, уменьшается их устойчивость, и образование промежуточного активного комплекса затрудняется, что, вероятно, объясняется понижением каталитической активности.

Заключение

В рамках данного исследования была изучена кинетика разложения пероксида водорода в водной среде в присутствии серебряного катализатора, синтезированного методом пропитки угля солью серебра. Полученные данные позволили определить закономерности процесса, включая влияние температуры и pH на скорость реакции, а также выявить каталитическую активность разработанного катализатора Ag-U в различных условиях. Результаты работы подтверждают эффективность данного подхода к синтезу катализаторов для реакций разложения пероксида водорода и могут служить основой для дальнейших исследований по оптимизации процесса и разработке новых, более эффективных каталитических систем.

Список литературы

1. Раздьяконова Г.И., Кохановская О.А., Лихолобов В.А. Саморазложение пероксида водорода на поверхности дисперсного углерода // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2015. Т. 7 (2). С. 180–190. DOI: 10.17725/rensit.2015.07.180.
2. Khalil L.B., Girgis B.S., Tawfik T.A. Decomposition of H₂O₂ on activated carbon obtained from olive stones // J. Chem. Technol. and Biotech. 2011. Vol. 76. P. 1132–1140. URL: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com> (дата обращения: 04.06.2025).
3. Морозов А.Р., Родионов А.И., Каменчук И.Н. Кинетика разложения пероксида водорода в воде // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. XXVIII. № 5. С. 46–49. URL: <https://www.muotr.ru> (дата обращения: 04.06.2025).
4. Клементьев В.Н., Кормилина Е.А., Назарова А.В., Окунцев Р.С. Стабилизация и разложение пероксида водорода в процессе эпоксидирования пропилена на гетерогенном титан-силикатном катализаторе TS-1 // Известия СПбГТИ(ТУ). 2015. № 28. С. 29–33. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2015.28.29.
5. Kudaybergenov S.E., Talykhanova G.S., Selenova B.S. Polymer protected and gel immobilized gold and silver nanoparticles in catalysis // Journal of inorganic and organometallic polymers and materials. 2016. Vol. 26, Is. 6. P. 1198–1211. DOI: 10.1007/s10904-016-0373-z.
6. Fueangfakan Chutrakulwong, Kheamrutai Thamaphat. Green synthesis of silver nanoparticles using durian rind extract and optical characteristics of surface plasmon resonance-based optical sensor for the detection of hydrogen peroxide // Green Processing and Synthesis. 2023. Vol. 12. P. 1–11. DOI: 10.1515/gps-2023-0070.
7. Панченков Г.М., Лебедев В.П. Химическая кинетика и катализ. 3-е изд., испр. и доп. М.: Химия, 1985. 590 с.
8. Cook P.F., Cleland W.W. Enzyme kinetics and mechanism. Carland science, 2007. 428 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chem.msu.ru>. (дата обращения: 04.06.2025).
9. Камбарова Г.Б. Синтез нанесенных на углеродный носитель серебряных катализаторов и изучение их физико-химических свойств // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. № 4. С. 73–77. DOI: 10.17513/mgrfi.13534.
10. Фидченко М.М. Углеродно-минеральные адсорбенты и катализаторы для очистки сточных вод от ПАВ: дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2023. 155 с.
11. Баранова В.Н., Селиванец Е.И., Боровская Л.В. Влияние внешних факторов на ферментативные реакции // The scientific heritage. 2021. № 79. С. 37–40. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-79-2-37-40.
12. Stryer L. The Michaelis – Menten model accounts for the kinetic properties of many enzymes // Engl. 2015. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK22430> (дата обращения: 04.06.2025).
13. Pędziwiatr P., Mikołajczyk F., Zawadzki D., Mikołajczyk K., Bedka A. Decomposition of hydrogen peroxide – kinetics and review of chosen catalysts // Acta Innovations. 2018. Vol. 26. P. 45–52. URL: <https://www.actainnovations.com> (дата обращения: 04.06.2025).
14. Кобозев Н.И. Избранные труды. М.: МГУ, 1978. 422 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://search.unatlib.ru> (дата обращения: 04.06.2025).
15. Kobotaeva N.S., Skorokhodova T.S., Razdyakonova G.I., Poleschuk O.. Physicochemical properties and catalytic activities of metal-carbon carrier composite materials // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2017. Vol. 91 (7). P. 1197–1203. DOI: 10.1134/S0036024417070172.