

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 1 2026

Научный журнал

Журнал основан в 2007 году

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-60735.

Электронная версия размещается на сайте <https://applied-research.ru>

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Стукова Наталия Юрьевна, к.м.н.

Технический редактор Доронкина Е.Н.

Корректоры: Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Зав. редакцией Шнуровозова Т.В.

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.** (Москва); 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.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. **Партноев 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.** (Санкт-Петербург); д.географ.н., проф. **Чодураев Т.М.** (Бишкек); д.б.н., проф. **Шалтыков К.Т.** (Бишкек); к.х.н. **Шарифуллина Л.Р.** (Москва); д.п.н., проф. **Щирин Д.В.** (Санкт-Петербург)

ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,556

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,357

Периодичность

12 номеров в год

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

Типография

ООО «НИЦ Академия Естествознания»

410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

E-mail

edition@rae.ru

Телефон

+7 (499) 705-72-30

Подписано в печать

30.01.2026

Дата выхода номера

27.02.2026

Формат

60x90 1/8

Усл. печ. л.

3,5

Тираж

100 экз.

Заказ

МЖПиФИ 2026/1

Распространяется по свободной цене

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH

№ 1 2026

Scientific journal

The journal is based in 2007

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-60735.**

The electronic version takes places on a site <https://applied-research.ru>

CHIEF EDITOR

Stukova Natalia Yurievna, Cand. Sci. (Medical)

Technical editor Doronkina E.N.

Correctors: Galenkina E.S., Dudkina N.A.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Head of the editorial board Shnurovozova T.V.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., Prof. **Abdullaev A.** (Dushanbe); Cand.Sc. **Alieva K.G.** (Makhachkala); D.Sc., Cand.Sc., Prof. **Aloev V.Z.** (Chegem-2); D.Sc., Prof. **Andreeva A.V.** (Ufa); Cand.Sc., Docent **Anichkina N.V.** (Moscow); Cand.Sc. **Baranovsky N.V.** (Tomsk); D.Sc., Docent **Belykh O.A.** (Irkutsk); D.Sc., Prof. **Burmistrova O.N.** (Ukhta); D.Sc., Docent **Bystrov V.A.** (Novokuznetsk); D.Sc., Prof. **Garbuz I.F.** (Tiraspol); D.Sc., Prof. **Gevorkyan E.A.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Gurbanov G.R.** (Baku); D.Sc., Docent **Ermolina S.A.** (Kirov); Cand.Sc. **Yesenamanova M.S.** (Atyrau); D.Sc., Cand.Sc., Prof. **Efremova N.F.** (Rostov-on-Don); D.Sc. **Zhurakovsky I.P.** (Novosibirsk); D.Sc., Docent **Ibraev I.K.** (Temirtau); Cand.Sc., Docent **Ismailov Z.I.** (Baku); D.Sc. **Kavtsevich N.N.** (Severomorsk); D.Sc., Prof. **Kalmykov I.A.** (Stavropol); D.Sc. **Kokoreva I.I.** (Almaty); D.Sc., Docent **Kopylov I.S.** (Permian); Cand.Sc., Docent **Korotchenko I.S.** (Krasnoyarsk); Cand.Sc., Docent **Kryazheva V.L.** (Nizhny Novgorod); D.Sc., Docent **Kulkov V.G.** (Volzhsky); D.Sc. **Larionov M.V.** (Balashov); D.Sc., Cand.Sc., Docent **Leontiev D.F.** (Irkutsk); D.Sc., Cand. Sc., Prof. **Lugovskoy A.M.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Nesvetaev G.V.** (Rostov-on-Don); D.Sc. **Nikitin S.N.** (p. Timiryazevsky); D.Sc., Docent **Oleshko O.A.** (Permian); D.Sc., Prof. **Partoev K.** (Dushanbe); Cand.Sc., Docent **Popova I.N.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Rogachev A.F.** (Volgograd); D.Sc. Docent **Rozykhodzhaeva G.A.** (Tashkent); D.Sc. **Sakiev K.S.** (Bishkek); D.Sc., Prof. **Sugak E.V.** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. **Trefilov B.B.** (Saint Petersburg); Cand.Sc., Docent **Khaidarov A.G.** (Saint Petersburg); D.Sc., Prof. **Charyshkin A.L.** (Saint Petersburg); D.Sc., Prof. **Choduraev T.M.** (Bishkek); D.Sc., Prof. **Shalpykov K.T.** (Bishkek); Cand.Sc. **Sharifullina L.R.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Shchirin D.V.** (Saint Petersburg)

ISSN 1996-3955

Impact-factor RISQ (two-year) = 0,556

Impact-factor RISQ (five-year) = 0,357

Periodicity	12 issues per year		
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History		
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47		
Editorial and publisher address	410056, Saratov, st. them. Chapaeva V.I., 56		
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5		
E-mail	edition@rae.ru	Telephone	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	30.01.2026	Number issue date	27.02.2026
Format	60x90 1/8	Conditionally printed sheets	3,5
Circulation	100 copies	Order	МЖПиФИ 2026/1

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

ИЗУЧЕНИЕ ЦИТОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ У МАКРОФАГОВ МЫШЕЙ
ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ГРАНУЛЕМАТОЗЕ

Ильин Д.А. 5

МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СПЕЦИАЛИСТОВ НА ЭТАПАХ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ
С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ:
ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Королева К.И. 11

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

ИССЛЕДОВАНИЕ БОРТОВОГО МАРШРУТИЗАТОРА НА ОСНОВЕ
CAN FD ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СИСТЕМАХ
СБОРА ДАННЫХ

Крылов А.С., Мягкова М.А. 17

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ
МНОГОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННОМ
ФЛОТАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Сергиянский Е.В. 23

CONTENTS

MEDICAL SCIENCES

ARTICLES

STUDY OF CYTOPHYSIOLOGICAL PROCESS OF FORMATION I
N MOUSE MACROPHAGES WITH EXPERIMENTAL GRANULOMATOSIS

Ilin D.A. 5

MULTIDISCIPLINARY MODEL OF SPECIALIST INTERACTION
AT THE STAGES OF REHABILITATION OF PATIENTS WITH
CARDIOVASCULAR DISEASES: DESIGN EXPERIENCE AND
EFFECTIVENESS EVALUATION

Koroleva K.I. 11

TECHNICAL SCIENCES

ARTICLES

RESEARCH OF AN ON-BOARD ROUTER BASED ON CAN FD
FOR APPLICATION IN RAILWAY DATA ACQUISITION SYSTEMS

Krylov A.S., Myagkova M.A. 17

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL
OF A MULTIPHASE FLOW IN A COMBINED FLOTATION APPARATUS

Sergiyanskiy E.V. 23

СТАТЬИ

УДК 616-092.9:611.018.53

**ИЗУЧЕНИЕ ЦИТОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ У МАКРОФАГОВ МЫШЕЙ
ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ГРАНУЛЕМАТОЗЕ****Ильин Д.А. ORCID ID 0009-0006-5410-8393**

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины»,
Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: ilindenis.ilin@yandex.ru*

Характер распространения заболеваемости туберкулезным гранулематозом определяет актуальность исследования его патогенеза, в котором макрофагам отводится значимая роль. Участие макрофагов в основных звеньях патогенеза туберкулезного гранулематоза детерминировано спецификой осуществления у них процессов формообразования, как отражения механизмов клеточной дифференцировки. Цель исследования состояла в оценке характера реализации цитофизиологического процесса формообразования у макрофагов различных классов ядерности в условиях экспериментального моделирования инфекционного гранулематоза. Материалом исследования являлись культуры перитонеальных клеток интактных и инфицированных мышей. Методы исследования состояли в цитологическом анализе макрофагов с учетом признаков идентификации процессов их формообразования. Результаты исследования указывают, что по сравнению с контролем в культурах экспериментальных групп прогрессивно возрастала относительная численность макрофагов с цитоморфологическими признаками выделения эндоплазмы и эктоплазмы, структуризации эндоплазмы, дифференцировки строения эктоплазмы. Максимальные значения этих показателей зарегистрированы на три месяца наблюдения. Интенсивность указанных процессов у многоядерных макрофагов значительно превосходила таковую у одноядерных в культурах всех используемых групп. В заключение следует заметить, что исследование формообразования макрофагов имеет научное значение для понимания механизмов их дифференцировки. Прикладное значение этих исследований определяется ролью макрофагов в патогенезе туберкулезного гранулематоза, что содействует разработке патогенетически аргументированных методов его терапевтической коррекции.

Ключевые слова: макрофаги, процессы формообразования, клеточная дифференцировка, многоядерные клетки, туберкулезный гранулематоз

**STUDY OF CYTOPHYSIOLOGICAL PROCESS OF FORMATION IN
N MOUSE MACROPHAGES WITH EXPERIMENTAL GRANULOMATOSIS****Ilin D.A. ORCID ID 0009-0006-5410-8393**

*Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center
of Fundamental and Translational Medicine", Novosibirsk, Russian Federation,
e-mail: ilindenis.ilin@yandex.ru*

The nature of the spread of tuberculosis granulomatosis determines the relevance of the study of its pathogenesis, in which macrophages play a significant role. The participation of macrophages in the main links of the pathogenesis of tuberculous granulomatosis is determined by the specifics of their formation processes, as a reflection of the mechanisms of cellular differentiation. The purpose of the study was to assess the nature of the cytophysiological formation process in macrophages of various classes of nuclearity under experimental modeling of infectious granulomatosis. The research material was peritoneal cell cultures of intact and infected mice. The research methods consisted in cytological analysis of macrophages, taking into account the principles of identification of their formation processes. The results of the study indicate that, in comparison with the control, the relative number of macrophages with cytomorphological signs of endoplasmic and ectoplasmic separation, endoplasmic structuring, and ectoplasmic differentiation increased progressively in the cultures of the experimental groups. The maximum values of these indicators were recorded for three months of follow-up. The intensity of these processes in multinucleated macrophages significantly exceeded that of mononuclear ones in the cultures of all the groups used. In conclusion, it should be noted that the study of macrophage formation is of scientific importance for understanding the mechanisms of their differentiation. The applied significance of these studies is determined by the role of macrophages in the pathogenesis of tuberculous granulomatosis, which contributes to the development of pathogenetically reasoned methods for its therapeutic correction.

Keywords: macrophages, processes of formation, cellular differentiation, multinucleated cells, tuberculous granulomatosis

Введение

Современные исследования вопросов эпидемиологии туберкулеза представляют интерес в плане оценки характера его распространения [1-3]. Наряду с легочным туберкулезом [4] отмечаются и другие его формы. Например, существуют абдоминальный

[5] и кожный туберкулез [6], туберкулезный менингит [7]. Наличие внелегочных форм туберкулеза указывает на существование серьезной проблемы, стоящей перед современной медициной. Очевидно, что особенности распространения заболеваемости туберкулезом определяют, в частности,

актуальность изучения его патогенеза. Интерес представляют цитологические и иммунологические аспекты гранулематозного воспаления [8, с. 55]. Значение макрофагов в патогенезе туберкулеза получило свое освещение в ряде научных публикаций [9-11].

Целесообразно отметить роль экспериментальных методов исследования цитофизиологических реакций макрофагов и их многоядерных производных, изученных на базе информативных технологий иммуноцитохимического анализа и функциональных тестов, включая оценку процессов экспрессии макрофагами цитокинов и реализации этими клетками их фагоцитозной активности [12]. Интерес имеет также изучение продукции макрофагами гидролитических ферментов и образования многоядерных макрофагальных производных [13]. Исследование этих процессов имеет значение в приложении к проблеме патогенеза туберкулезного гранулематоза. Далее заметим, что мультинуклеация макрофагов, вероятно, обуславливает их функциональный потенциал. Действительно, многоядерные макрофаги имеют высокий уровень их цитофизиологической активности в отношении продукции медиаторов и фагоцитозной способности [12].

Справедливо считать, что класс ядерности макрофагов является одной из их базисных характеристик. Рациональным методологическим подходом было бы отнесение процессов мультинуклеации макрофагов к морфологическим проявлениям цитофизиологического процесса их дифференцировки, вследствие которого они приобретают специфические функциональные характеристики, что непосредственно сопряжено с реакциями клеточного формообразования. Поэтому целесообразно рассмотрение вопросов формообразования и реализации функциональной активности макрофагов, причем дифференцировка клеток, являющаяся фундаментальным молекулярно-клеточным процессом, вероятно, имеет тесную сопряженность с механизмами макрофагальной мультинуклеации. Взаимосвязь механизмов образования многоядерных макрофагов и их формообразования – составляющих их дифференцировки, требует детального изучения.

Поскольку реализация процесса клеточного распластывания и характер локализации ядер обусловлены перестройками элементов цитоскелета [14, с. 18] и представляют собой отражение реакций формообразования макрофагов, носящих дифференцировочный смысл, то было бы логичным считать, что и осуществление таких типов формообразующих целлюляр-

ных реакций, как выделение эндоплазмы и эктоплазмы, структуризация последней, а также приобретение клеткой дифференцированного строения эктоплазмы в своей основе имеют аналогичные причины ввиду изменения локализации субклеточных структур.

Комплексная оценка указанных цитофизиологических реакций может проводиться на базе цитологического анализа морфофункциональных характеристик макрофагов, что содействует пониманию особенностей осуществления их формообразования и мультинуклеации, относясь к процессу дифференцировки макрофагов. Уточнение аспектов его исполнения способствует пониманию соответствующих вопросов патогенеза туберкулезного гранулематоза с целью последующей разработки эффективных методов его терапевтической коррекции, имеющих в основе избирательный контроль процессов макрофагальной дифференцировки.

Цель исследования – оценить характер реализации цитофизиологического процесса формообразования у макрофагов различных классов ядерности в условиях экспериментального моделирования инфекционного гранулематоза.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования выступали макрофагосодержащие культуры перитонеальных клеток мышей линии BALB/c. Контрольная и экспериментальные группы были сформированы из культур перитонеальных клеток, выделенных соответственно от интактных и БЦЖ-инфицированных мышей указанной линии и эксплантированных *in vitro*. Животных содержали в условиях прямого доступа к воде и пище. Выведение мышей из эксперимента проводили методом дислокации шейных позвонков под эфирным наркозом через 1, 2, 3, 6 месяцев после их БЦЖ-инфицирования. Внутривентрикулярные инъекции вакцины БЦЖ проводили мышам в дозе 0,5 мг. Инкубацию клеточных культур осуществляли в течение 48 часов в среде 199 при температуре 37°C.

Цитологический анализ препаратов культур перитонеальных клеток реализовали методами световой микроскопии. Определяли относительное количество макрофагов с цитоморфологическими признаками выделения эктоплазмы и эндоплазмы. Оценивали величины относительной численности макрофагов с признаками специализации структуры эндоплазмы, к которым относили обособление комплекса органелл, визуализируемого в виде плотной области, находящейся непосредственно вокруг

и между ядер, а также прилегающей к нему по периферии светлой зоны, имеющей везикулярное строение, что ассоциировано с присутствием цистерн эндоплазматического ретикулаума. Проводили определение относительной частоты встречаемости макрофагов с признаками дифференцирования строения эктоплазмы, к которым причисляли наличие плащевидного распластывания краевой зоны цитоплазмы, занимающей значительную площадь клетки, а также нередкое присутствие профилированного контура, в том числе с цитоплазматическими выростами. Анализ всех указанных признаков морфофункциональной дифференцировки клеток, связанной с процессом их формообразования, проводили дифференцированно для субпопуляций мононуклеарных и многоядерных макрофагов. Используя методы математической статистики, определяли величины средней арифметической и стандартной ошибки средней оцениваемых параметров, достоверность различий значений которых принимали при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Реализация комплексного цитологического анализа структурно-функциональных характеристик макрофагов и их полиядерных форм дает основания утверждать, что по сравнению с контролем в культурах перитонеальных клеток экспериментальных групп отмечено прогрессивное возрастание относительной численности одноядерных и многоядерных макрофагов с цитоморфологическими признаками процессов выделения эктоплазмы и эндоплазмы, при значительном превалировании многоядерных макрофагальных производных в отношении указанного цитофизиологического процесса с максимальным уровнем учитываемого показателя на 3 месяца наблюдения и существенным сниже-

нием его величины на 6 месяцев проведения эксперимента относительно предыдущего периода (табл.).

Аналогичная тенденция в динамике изменения уровней показателей структуризации эндоплазмы и дифференцировки строения эктоплазмы в субпопуляциях одноядерных и полинуклеарных макрофагов наблюдалась при оценке отмеченных параметров в культурах перитонеальных клеток экспериментальных групп по сравнению с соответствующим контролем (табл.). При этом уровни интенсивности реализации процессов структуризации эндоплазмы и дифференцировки строения эктоплазмы у многоядерных макрофагов существенно превосходили степень их активности у одноядерных макрофагов (табл.), что указывает на высокий уровень функциональной способности полинуклеаров. В частности, на 2-й и 3-й месяцы наблюдения относительная численность многоядерных макрофагов с признаками дифференцировки строения эктоплазмы значительно превосходила величину аналогичного показателя у одноядерных макрофагов (табл.), что свидетельствует о потенциальной способности мультинуклеаров к реализации их интегративной функции и последующему увеличению их класса ядерности вследствие осуществления такого механизма макрофагальной мультинуклеации, как клеточная фузия.

В культурах экспериментальных групп наблюдалось прогрессивное увеличение интенсивности процессов формообразования одноядерных и полинуклеарных макрофагов с максимальным уровнем активности этих цитофизиологических реакций в основной период гранулемогенеза, причем напряженность реализации процессов формообразования у многоядерных макрофагов существенно превосходила таковую у одноядерных.

Анализ формообразования макрофагов БЦЖ-инфицированных мышей (%)

Учет структурных характеристик	Тип	Контроль	БЦЖ 1 месяц	БЦЖ 2 месяца	БЦЖ 3 месяца	БЦЖ 6 месяцев
Разделение на эктоплазму и эндоплазму	О	20,5±2,0	25,5±2,2	39,5±3,6*	47,5±2,6*	22,3±2,0
	М	39,3±2,6	44,5±3,6	56,3±4,2*	73,8±4,2*	41,5±2,7
Специализация строения эндоплазмы	О	12,3±1,1	22,3±2,0*	29,3±2,6*	36,5±2,7*	15,5±1,5
	М	28,8±2,6	34,5±3,4	43,8±4,2*	58,8±5,5*	26,3±2,4
Дифференциация структуры эктоплазмы	О	14,8±1,0	19,8±1,1*	22,3±2,0*	26,3±2,4*	12,3±1,1
	М	25,3±2,0	30,8±2,6	39,5±3,0*	53,8±4,2*	23,5±2,3

Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования; * $p < 0,05$ по сравнению с контролем; О – одноядерные макрофаги; М – многоядерные макрофаги.

Было бы логичным считать, что многоядерные макрофаги, имеющие высокий уровень цитофизиологического потенциала, обладают выраженной функциональной способностью, обуславливающей их активное участие в механизмах клеточной дифференцировки, сопряженных с процессами формообразования макрофагов.

При обсуждении аспектов дифференцирования структуры эктоплазмы можно заметить, что распластывание краевой зоны цитоплазмы и образование цитоплазматических выростов, в том числе цитоплазматических отростков и ламеллоподий, нередко сопутствуют дифференцированию строения терминальной зоны цитоплазмы, выражающемуся в существенном возрастании периметра клеточного контура, что содействует интерцеллюлярной интеграции путем межклеточных контактов и фузии клеток. Если учесть роль фузии макрофагов в качестве механизма их мультиноклеации, то становится понятным значение исследований процессов, предшествующих формированию многоядерных макрофагов. Высоким уровнем цитофизиологической активности многоядерных макрофагов обусловлена их роль в качестве важных участников клеточных процессов, чем определяется целесообразность исследования значения многоядерных макрофагов в продуцировании регуляторных и ферментных белков, что детерминирует роль макрофагов в клеточных реакциях, определяющих патогенез туберкулезного гранулематоза.

В то же время логичным представляется предположение о том, что интегративные функции макрофагов, реализуемые посредством контактных взаимодействий, могут считаться следствием процесса дифференцированного строения эктоплазмы. Причем участие макрофагов в интегративных межклеточных взаимодействиях имеет соответствующую цитофизиологическую направленность в плане контроля и синхронизации внутриклеточных и интерцеллюлярных процессов. Тогда как разделение на эктоплазму и эндоплазму, вероятно, содействует оптимизации осуществления комплекса цитоплазматических отношений и, следовательно, способствует реализации внутриклеточных процессов синхронизации синтеза регуляторных, ферментных и структурных белков – участников широкого спектра молекулярно-клеточных механизмов патогенеза туберкулезного гранулематоза. Изучение продукции макрофагами и их многоядерными производными провоспалительных цитокинов и гидролитических ферментов содействует исследованию соответственно аспектов реализации этими

клетками их провоспалительного и проdestructивного потенциалов, что в очевидной форме обладает высокой степенью актуальности в отношении рассмотрения вопросов соответственно гранулемогенеза и некроза тканей – осложнения туберкулезного гранулематоза.

Далее заметим, что наблюдаемые у макрофагов специализация структуры эндоплазмы, как и выделения эктоплазмы и эндоплазмы и дифференциации структуры эктоплазмы, обусловлены ролью перестройки элементов цитоскелета, носящих определенный характер, что имеет вероятной цитофизиологической целью оптимизацию синтеза, аккумуляции и перераспределения продуцируемых белков, являющихся участниками контролирующих и исполнительных механизмов последующих гистиоцитарных процессов и составляющими ряда внутриклеточных структур.

В плане перспективных исследований участия макрофагов в процессах их формообразования можно отметить целесообразность изучения особенностей модифицирования эктоплазмо-эндоплазматических и ядерно-цитоплазматических соотношений, в обоих случаях детерминированных ролью перестройки элементов цитоскелета и направленных на оптимизацию субцеллюлярных отношений, обуславливающую адекватность исполнения комплекса внутриклеточных процессов. Вероятно, что использование информативных методов иммуноцитохимического анализа при идентификации белковых компонентов цитоскелета и последующей оценке модифицирования характера организации его строения с целью уточнения особенностей перестройки элементов такового окажет содействие в изучении вышеуказанных процессов.

Определение объема продуцируемых макрофагами регуляторных и ферментных белков позволит оценить значение соответствующих факторов в реализации каскада молекулярно-клеточных процессов с участием различных субпопуляций макрофагов. Целесообразно указать на необходимость детального изучения специфики экспрессии макрофагами молекул клеточной поверхности, обеспечивающих процессы интеграции и фузии макрофагов, что информативно при идентификации этих молекул в краевой зоне клеток с привязкой к исследованию дифференциации структуры эктоплазмы.

Вероятно, что M1/M2-поляризация макрофагов [15] может считаться проявлением клеточной дифференцировки. Не исключено, что в этом смысле следует говорить о цитофизиологической направленности

данного процесса. Формообразующие реакции модифицирования структуры эктоплазмы и эндоплазмы имеют очевидное морфологическое выражение, и речь может идти о процессе морфофункциональной дифференцировки макрофагов. Поэтому целесообразно проведение исследований сопряженности обоих типов процессов макрофагальной дифференцировки. Вероятна взаимосвязь формообразования и мультинуклеации макрофагов, исследование сопряженности которых, в обоих случаях обладающих значением как механизмов клеточной дифференцировки, позволит уточнить этот фундаментальный цитофизиологический аспект.

Рассмотренные типы формообразующих процессов определяются активными перестройками элементов цитоскелета, в частности обуславливающими распластывание краевой зоны цитоплазмы, что содействует контакту клеток перед их слиянием. Причем фузия макрофагов является ведущим механизмом их мультинуклеации в рассматриваемых патологических условиях [13]. В то же время очевиден факт участия перестроек элементов цитоскелета в реализации амитотического деления ядер [14, с. 18]. Поэтому вполне понятно, что ролью перестроек элементов цитоскелета макрофагов детерминированы оба процесса их дифференцировки – формообразование и мультинуклеация макрофагов вследствие их фузии и амитотического деления ядер.

Не исключено, что дальнейшее изучение процессов мультинуклеации и формообразования макрофагов, обуславливающих соответственно возрастание их функциональной активности и оптимизацию внутриклеточных процессов, определяющуюся адекватным характером их субцеллюлярных отношений ввиду приобретения клетками дифференцированного строения их эндоплазмы, детерминирующих в первом случае значимую роль многоядерных макрофагов в качестве активных участников межклеточных взаимодействий, а во втором – позволяющих им реализоваться вследствие обеспечения внутриклеточных механизмов их осуществления, будет содействовать пониманию фундаментального характера взаимосвязи обоих цитофизиологических процессов макрофагальной дифференцировки.

Заключение

В рассматриваемых патологических условиях интенсивность формообразующих процессов выделения эндоплазмы и эктоплазмы, структуризации эндоплазмы и дифференцировки строения эктоплазмы имела зависимость от сроков наблюдения и клас-

сов ядерности макрофагов. Оптимизация интрацеллюлярных отношений вследствие выделения эндоплазмы и эктоплазмы и ее результат – модифицирование функциональной способности макрофагов, структуризация эндоплазмы и следствие этого процесса – обеспечение адекватного синтеза белков и их аккумуляции в эндоплазматическом ретикулуле для реализации интрацеллюлярных процессов и межклеточных интеракций, а также наличие дифференцированной структуры эктоплазмы и ее итог – эффективные контактные интерцеллюлярные взаимодействия и клеточная мультинуклеация, имеющая результатом возрастание цитофизиологической активности макрофагов, обуславливают процессы их формообразования. Они носят характер клеточной дифференцировки, и особенности их осуществления в условиях инфекционного гранулематоза имеют определяющее значение для реализации его основных патогенетических звеньев, непосредственно сопряженных с ролью макрофагов и их полиядерных производных, характеризующихся высокой функциональной способностью, обуславливающей их патогенетическое значение.

Успешное изучение отмеченных цитофункциональных реакций макрофагов, обуславливающих фундаментальные механизмы клеточной дифференцировки и сопряженных с ней, обладает теоретическим значением и требует их систематизации с целью разработки комплексной классификации процессов формообразования и дифференцировки макрофагов. Понимание патогенетического смысла процессов формообразования и дифференцировки макрофагов в условиях инфекционного гранулематоза оказывает содействие в уточнении ряда аспектов реализации патогенеза туберкулезного гранулематоза, что способствует разработке патогенетически обоснованных методов терапевтической коррекции этого инфекционного гранулематоза.

Список литературы

1. Dhamnetiya D., Arora S., Jha R.P. Tuberculosis burden in India and its control from 1990 to 2019: Evidence from global burden of disease study 2019 // *Indian journal of tuberculosis*. 2023. Vol. 70. Is. 1. P. 87-98. DOI: 10.1016/j.ijtb.2022.03.016.
2. Mane S.S., Shrotriya P. Current Epidemiology of Pediatric Tuberculosis // *Indian Journal of Pediatrics*. 2024. Vol. 91. Is. 7. P. 711-716. DOI: 10.1007/s12098-023-04910-4.
3. Zimmer A.J., Clinton J.S., Oga-Omenka C., Heitkamp P., Nawina Nyirenda C., Furin J., Pai M. Tuberculosis in times of COVID-19 // *Journal of Epidemiology and Community Health*. 2022. Vol. 76. Is. 3. P. 310-316. DOI: 10.1136/jech-2021-217529.
4. Sun W., He X., Zhang X., Wang X., Lin W., Wang X., Liang Y. Diagnostic value of lncRNA NORAD in pulmonary tuberculosis and its regulatory role in Mycobacterium tuberculosis infection of macrophages // *Microbiology and Immunology*. 2022. Vol. 66. Is. 9. P. 433-441. DOI: 10.1111/1348-0421.12986.

5. Sartoris G., Seddon J.A., Rabie H., Nel E.D., Schaaf H.S. Abdominal Tuberculosis in Children: Challenges, Uncertainty, and Confusion // *Journal of the Pediatric Infectious Diseases Society*. 2020. Vol. 9. Is. 2. P. 218-227. DOI: 10.1093/jpids/piz093.
6. Kaul S., Kaur I., Mehta S., Singal A. Cutaneous tuberculosis. Part I: Pathogenesis, classification, and clinical features // *Journal of the American Academy of Dermatology*. 2023. Vol. 89. Is. 6. P. 1091-1103. DOI: 10.1016/j.jaad.2021.12.063.
7. Huynh J., Donovan J., Phu N.H., Nghia H.D.T., Thuong N.T.T., Thwaites G.E. Tuberculous meningitis: progress and remaining questions // *The Lancet Neurology*. 2022. Vol. 21. Is. 5. P. 450-464. DOI: 10.1016/S1474-4422(21)00435-X.
8. Шкурупий В.А. Туберкулезный гранулематоз. Цитофизиология и адресная терапия. М.: ПАМН, 2007. 536 с. ISBN 978-5-7901-0098-7.
9. Lewinsohn D.M., Lewinsohn D.A. New Concepts in Tuberculosis Host Defense // *Clinics in Chest Medicine*. 2019. Vol. 40. Is. 4. P. 703-719. DOI: 10.1016/j.ccm.2019.07.002.
10. Russell D.G., Simwela N.V., Mattila J.T., Flynn J., Mwandumba H.C., Pisu D. How macrophage heterogeneity affects tuberculosis disease and therapy // *Nature Reviews Immunology*. 2025. Vol. 25. Is. 5. P. 370-384. DOI: 10.1038/s41577-024-01124-3.
11. Sun Q., Shen X., Ma J., Lou H., Zhang Q. Activation of Nrf2 signaling by oltipraz inhibits death of human macrophages with mycobacterium tuberculosis infection // *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2020. Vol. 531, Is. 3. P. 312-319. DOI: 10.1016/j.bbrc.2020.07.026.
12. Il'in D.A., Arkhipov S.A., Shkurupy V.A. In Vitro Study of Cytophysiological Characteristics of Multinuclear Macrophages from Intact and BCG-Infected Mice // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2016. Vol. 160. Is. 5. P. 668-671. DOI: 10.1007/s10517-016-3245-1.
13. Il'in D.A. Multinucleation and Apoptosis of Macrophages in BCG-Infected Mice and Production of Cathepsins and Matrix Metalloproteinases in These Cells // *Cell and Tissue Biology*. 2025. Vol. 19. Is. 1. P. 60-65. DOI: 10.1134/S1990519X25010079.
14. Ильин Д.А. Многоядерные макрофаги. Новосибирск: Наука, 2011. 56 с. ISBN 978-5-02-018974-4.
15. Il'in D.A., Shkurupy V.A. The In Vitro M1/M2 Polarization of Macrophages of BCG-Infected Mice // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2020. Vol. 169. Is. 4. P. 467-469. DOI: 10.1007/s10517-020-04910-w.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

УДК 616.1-083

МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ НА ЭТАПАХ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ: ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Королева К.И. ORCID ID 0009-0008-8629-6944

*Частное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский медико-социальный институт», Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: dr.koroleva_kristina@mail.ru*

Цель исследования заключалась в разработке и оценке эффективности мультидисциплинарной модели взаимодействия специалистов на этапах медицинской реабилитации пациентов с заболеваниями сердечно-сосудистой системы. Работа выполнена в формате проспективного клинического наблюдения на базе специализированного медицинского учреждения. В исследование включены 350 пациентов после острого коронарного синдрома, аортокоронарного шунтирования, стентирования коронарных артерий, а также с хронической ишемической болезнью сердца и стабильной сердечной недостаточностью. Реабилитационная программа включала дозированную физическую тренировку, образовательные мероприятия, психоэмоциональную поддержку, нутриционное сопровождение и контроль медикаментозной терапии; ключевым принципом являлось взаимодействие кардиолога, врача восстановительной медицины, специалиста по лечебной физкультуре, психолога, диетолога и координатора пациента. Эффективность оценивалась по функциональным, клиническим, психоэмоциональным и поведенческим показателям в динамике с последующим шестимесячным наблюдением. Полученные результаты показали выраженное улучшение толерантности к физической нагрузке, увеличение дистанции шестиминутного теста ходьбы, рост аэробной работоспособности и снижение выраженности сердечной недостаточности. Отмечено улучшение качества жизни, снижение уровней тревоги и депрессии, повышение приверженности медикаментозной терапии и регулярной физической активности, а также значимое снижение частоты повторных госпитализаций. Таким образом, мультидисциплинарная модель реабилитации продемонстрировала клиническую, поведенческую и организационную эффективность, обеспечивая улучшение функционального состояния, качества жизни и прогноза пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями и может рассматриваться как приоритетное направление развития системы кардиореабилитации.

Ключевые слова: кардиореабилитация, мультидисциплинарная команда, сердечно-сосудистые заболевания, физическая работоспособность, качество жизни, приверженность лечению, сердечная недостаточность, повторные госпитализации

MULTIDISCIPLINARY MODEL OF SPECIALIST INTERACTION AT THE STAGES OF REHABILITATION OF PATIENTS WITH CARDIOVASCULAR DISEASES: DESIGN EXPERIENCE AND EFFECTIVENESS EVALUATION

Koroleva K.I. ORCID ID 0009-0008-8629-6944

*Private Educational institution of higher education
“Saint Petersburg Medical and Social Institute”, Saint Petersburg,
Russian Federation, e-mail: dr.koroleva_kristina@mail.ru*

The aim of the study was to develop and evaluate the effectiveness of a multidisciplinary model of specialist interaction at the stages of medical rehabilitation in patients with cardiovascular diseases. The study was conducted as a prospective clinical observation at a specialized medical institution. A total of 350 patients were included, comprising individuals after acute coronary syndrome, coronary artery bypass grafting, percutaneous coronary interventions (stent implantation), as well as patients with chronic ischemic heart disease and stable chronic heart failure. The rehabilitation program included individualized physical training, educational interventions, psycho-emotional support, nutritional counseling, and control of pharmacotherapy; the key principle of the program was coordinated interaction between the cardiologist, rehabilitation physician, physical therapy specialist, psychologist, dietitian, and patient care coordinator. Effectiveness was assessed dynamically using functional, clinical, psycho-emotional, and behavioral indicators, with subsequent six-month follow-up. The results demonstrated a marked improvement in exercise tolerance, an increase in six-minute walk distance, enhancement of aerobic capacity, and a reduction in the severity of heart failure. Improvements in quality of life, reductions in anxiety and depressive symptoms, enhanced adherence to pharmacotherapy and regular physical activity, as well as a significant decrease in rehospitalization rates were observed. Thus, the multidisciplinary rehabilitation model demonstrated clinical, behavioral, and organizational effectiveness, leading to improvements in functional status, quality of life, and prognosis in patients with cardiovascular diseases, and may be considered a priority direction in the development of cardiac rehabilitation systems.

Keywords: cardiac rehabilitation, multidisciplinary team, cardiovascular diseases, exercise capacity, quality of life, treatment adherence, heart failure, rehospitalizations

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания продолжают оставаться ведущей причиной смертности и инвалидизации населения, определяя значимую нагрузку на системы здравоохранения, экономику и общество [1-3]. Современные достижения кардиологии обеспечили значительное увеличение выживаемости пациентов после острых коронарных событий и хирургических вмешательств, однако выжить – не значит вернуться к полноценной жизни. На первый план выходит вопрос восстановления функциональной активности, улучшения качества жизни, профилактики повторных сердечно-сосудистых осложнений и формирования долгосрочной приверженности лечению [4; 5].

Реабилитация кардиологических пациентов давно перестала быть исключительно «физической тренировкой». Это комплексный, по сути, биопсихосоциальный процесс, который объединяет медицинские, физиологические, психологические, образовательные и социальные компоненты [6-8]. В идеале это непрерывная траектория от стационара к амбулаторному этапу, а затем – к самостоятельной, но поддерживаемой пациентом реабилитационной активности. В реальной клинической практике именно на этой траектории возникают провалы: разобщённость специалистов, отсутствие координации, недостаточная коммуникация, слабая организационная структура программ.

Многочисленные исследования показывают, что фрагментарность медицинской помощи ведёт к снижению эффективности реабилитации, потере пациентов на переходных этапах, недостаточной приверженности физическим тренировкам, медикаментозной терапии и модификации образа жизни [9-11]. Пациент буквально «распадается» на отдельные задачи: кардиолог лечит сердце, диетолог работает с питанием, психолог занимается тревогой, инструктор лечебной физкультуры (ЛФК) – нагрузкой. Но если нет единой логики, пациент не получает целостной помощи, а система теряет результат.

Мультидисциплинарная модель реабилитации создаёт иную архитектуру процесса. Это не простое сосуществование разных специалистов, а управляемое взаимодействие, где каждый участник имеет чётко определённые функции, общие цели, согласованные подходы к оценке эффективности и единую структуру коммуникации [12]. Такая модель позволяет не только повысить клинические результаты, но и изменить поведение пациента, укрепить его уча-

стие в терапии, а значит – воздействовать на долгосрочный прогноз.

Отдельного внимания требует организационный аспект. Для построения эффективной системы необходимы не только профессиональные компетенции отдельных специалистов, но и выстроенные механизмы координации, преемственности этапов, протоколы взаимодействия, цифровая поддержка маршрутизации пациента и мониторинга результатов [13]. Иначе даже самая грамотная команда превращается в набор параллельно работающих энтузиастов.

В этой связи актуальным становится вопрос не просто клинической эффективности кардиореабилитации как таковой, а эффективности именно мультидисциплинарной модели взаимодействия специалистов [14]. Нас интересует не только «лечит ли», но и как, на каких организационных основаниях, каким образом достигается согласованность действий и к чему это приводит с точки зрения клинических и поведенческих исходов [15].

Таким образом, необходимость разработки структурированной, научно обоснованной и практически применимой мультидисциплинарной модели кардиореабилитации обусловлена совокупностью факторов: высокой распространённостью сердечно-сосудистых заболеваний, потребностью в восстановлении качества жизни, доказанными преимуществами реабилитационных программ и недостаточной разработанностью механизмов междисциплинарного взаимодействия в реальной практике.

Цель исследования – разработка и оценка эффективности мультидисциплинарной модели взаимодействия специалистов на этапах медицинской реабилитации пациентов с заболеваниями сердечно-сосудистой системы.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в формате проспективного клинического наблюдения и было направлено на оценку эффективности мультидисциплинарной модели реабилитации у пациентов с заболеваниями сердечно-сосудистой системы. Работа проводилась на базе специализированного медицинского учреждения, располагающего необходимыми организационными и кадровыми ресурсами для проведения программ медицинской реабилитации. Все пациенты были ознакомлены с целями исследования и подписали информированное добровольное согласие; исследование соответствовало принципам Хельсинкской декларации и действующим нормативным требованиям.

В программу были включены 350 пациентов в возрасте от зрелого до пожилого периода, средний возраст в выборке составлял 62 года. В исследование включались пациенты после перенесённого острого коронарного синдрома, аортокоронарного шунтирования, чрескожных коронарных вмешательств (стентирования), а также больные с хронической ишемической болезнью сердца и стабильной хронической сердечной недостаточностью. Критериями включения являлись клиническая стабилизация к моменту начала реабилитации, возможность выполнения физической нагрузки и участие в программе на протяжении всего её курса. Критериями исключения служили выраженная декомпенсация сердечной деятельности, гемодинамически значимые и жизнеугрожающие нарушения ритма, нестабильная стенокардия, тяжёлая сопутствующая патология, препятствующая проведению тренировочной программы, острые воспалительные или инфекционные процессы, а также выраженные когнитивные нарушения или отказ от участия.

Структура реабилитационной программы базировалась на мультидисциплинарной модели взаимодействия специалистов. Ведущими участниками команды являлись кардиолог, врач восстановительной медицины, специалист по лечебной физической культуре, психолог, диетолог и медицинская сестра-координатор. Кардиолог осуществлял медицинский контроль, оценивал безопасность нагрузок и корректировал терапию. Врач восстановительной медицины координировал работу команды и обеспечивал преемственность этапов. Специалист по ЛФК формировал индивидуальные программы тренировок с постепенным увеличением нагрузки. Психолог проводил диагностику эмоционального состояния, психокоррекционные мероприятия и мотивационную поддержку. Диетолог занимался коррекцией пищевого поведения, а медицинская сестра обеспечивала мониторинг, обучение пациента и организационную связь внутри команды. Взаимодействие специалистов строилось на регулярных совместных обсуждениях, единых протоколах ведения и стандартизированной медицинской документации.

Реабилитационная программа включала дозированную физическую тренировку, образовательные занятия, коррекцию факторов риска, психологическую поддержку, а также контроль и оптимизацию медикаментозной терапии. Продолжительность основного курса составляла несколько недель, после чего предусматривалось амбулаторное наблюдение и поддерживающий

этап, ориентированный на закрепление сформированных навыков.

Оценка эффективности программы осуществлялась в динамике: при включении пациента и по завершении основного этапа реабилитации, а также с последующим наблюдением в течение 6 месяцев. Анализ проводился по совокупности клинических, функциональных, психоэмоциональных и поведенческих показателей. Для объективизации функционального статуса применялся шестиминутный тест ходьбы, нагрузочное тестирование и определение толерантности к физической нагрузке, анализировался показатель пикового потребления кислорода. Оценивались функциональные классы сердечной недостаточности. Для изучения качества жизни использовались стандартизированные опросники (включая SF-36), для оценки тревожно-депрессивных проявлений – шкала HADS. Дополнительно фиксировались показатели приверженности медикаментозной терапии, регулярности выполнения физических нагрузок, отказа от курения и других изменений образа жизни. На отдалённом этапе анализировались повторные госпитализации и сердечно-сосудистые события.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием стандартных методов описательной и сравнительной статистики. Оценивались частоты, медианные значения и динамика показателей. Достоверность различий определялась при уровне значимости $p < 0,05$, что позволило интерпретировать выявленные изменения как статистически и клинически значимые.

Результаты исследования и их обсуждение

Представленные результаты основаны на анализе 350 пациентов, завершивших полную программу мультидисциплинарной реабилитации. Средний возраст составил 62 года; мужчины – 69%, женщины – 31%. В структуре включённых пациентов преобладали лица, перенесшие острый коронарный синдром (52%), далее следовали пациенты после аортокоронарного шунтирования (19%), стентирования коронарных артерий (23%), а также больные с хронической ишемической болезнью сердца и сердечной недостаточностью (27%), нередко с сочетанием нескольких состояний. Уже на этапе функциональной оценки было показано, что участие в программе реабилитации сопровождалось достоверным улучшением физической работоспособности. Дистанция шестиминутного теста ходьбы увеличилась с 390 до 472 метров ($p < 0,001$), при этом выраженный прирост показателя

был зарегистрирован у большинства пациентов; максимальная динамика отмечалась в подгруппах после АКИП и перенесённого ОКС. Толерантность к физической нагрузке, по данным нагрузочного тестирования, возросла с 75 до 105 Вт ($p < 0,001$), а пиковое потребление кислорода увеличилось с 17 до 20 мл/кг/мин. ($p < 0,001$), что свидетельствует о повышении аэробного потенциала и функциональных резервов организма. Значимые изменения зафиксированы и в характеристике функционального класса сердечной недостаточности: доля пациентов с III ФК снизилась с 41 до 18%, а количество пациентов с I-II ФК, наоборот, увеличилось с 59 до 82% ($p < 0,01$), что особенно важно в контексте восстановления повседневной активности и трудоспособности.

Не менее значимой оказалась динамика показателей качества жизни и психоэмоционального состояния. Суммарный физический компонент по шкале SF-36 увеличился с 41 до 49 баллов ($p < 0,001$), при этом клинически значимое улучшение было отмечено более чем у двух третей пациентов. По шкале тревожно-депрессивных расстройств HADS уровень тревоги снизился с 9 до 6 баллов, а депрессивных проявлений – с 8 до 6 баллов ($p < 0,001$), что отражает влияние психологической поддержки и образовательных мероприятий на эмоциональное состояние больных. Существенные изменения выявлены и в поведенческой сфере. Приверженность медикаментозной терапии возросла с 62 до 88% ($p < 0,001$), а доля пациентов, регулярно выполнявших рекомендованные физические нагрузки, увеличилась с 35 до 79% ($p < 0,001$). Среди куривших пациентов полный отказ от курения был достигнут у 45%, а существенное снижение табачной нагрузки отмечено у 30%. Важным организационным результатом стало то, что все включенные пациенты завершили программу, что отражает устойчивость и управляемость мультидисциплинарной модели.

В отдалённом шестимесячном наблюдении частота повторных госпитализаций по сердечно-сосудистым причинам составила 10%, тогда как в сопоставимой когорте без мультидисциплинарной модели этот показатель достигал 19% ($p = 0,028$). Повторные коронарные события были зарегистрированы у 6% пациентов, причём наименьшая частота осложнений отмечалась у лиц с высокой приверженностью медикаментозному лечению и регулярной физической активности. В совокупности полученные данные демонстрируют, что внедрение мультидисциплинарной модели кардиореабилитации обеспечивает значимое улуч-

шение функционального состояния, качества жизни, психоэмоционального статуса, формирует устойчивое лечебное поведение и снижает риск повторных неблагоприятных сердечно-сосудистых событий, подтверждая как клиническую, так и организационную эффективность данного подхода.

Полученные результаты позволяют рассматривать мультидисциплинарную модель кардиореабилитации не только как совокупность клинических вмешательств, но и как целостную организационную систему, в которой именно согласованность действий специалистов определяет итоговый эффект. Выраженная положительная динамика функциональных, психоэмоциональных и поведенческих показателей свидетельствует о том, что эффективность реабилитации формируется на стыке клинической обоснованности программ и качества их организационной реализации.

Значительное улучшение показателей физической работоспособности, в том числе прирост дистанции шестиминутного теста ходьбы и увеличение толерантности к нагрузке, отражает не только адекватность тренировочных режимов, но и своевременность их назначения, безопасность и последовательность наращивания нагрузки. В условиях фрагментированной помощи подобная динамика, как правило, менее выражена, поскольку пациенты либо преждевременно прекращают занятия, либо выполняют их нерегулярно. В данном исследовании стабильность функциональных улучшений у большинства пациентов указывает на высокую степень управляемости реабилитационного процесса.

Снижение функционального класса сердечной недостаточности у значительной части пациентов имеет особое клиническое и социальное значение, поскольку напрямую связано с восстановлением повседневной активности и снижением зависимости от медицинской помощи. Важно подчеркнуть, что подобные изменения в меньшей степени обусловлены исключительно медикаментозной терапией, а в большей – комплексным воздействием физических тренировок, образовательных мероприятий и психологической поддержки, реализуемых в рамках единой мультидисциплинарной стратегии.

Отдельного внимания заслуживает динамика показателей качества жизни и психоэмоционального состояния. Улучшение физического и психологического компонентов по шкале SF-36, а также снижение тревожно-депрессивных проявлений по шкале HADS подтверждают, что кардиореабилитация должна рассматриваться как биопси-

хосоциальный процесс. Психологическое сопровождение и образовательная работа способствуют снижению тревоги, формированию реалистичных ожиданий и повышению уверенности пациента в собственных возможностях, что, в свою очередь, положительно влияет на приверженность лечению и активное участие в реабилитации.

Выраженные изменения поведенческих показателей – рост приверженности медикаментозной терапии, увеличение доли пациентов, регулярно выполняющих физические нагрузки, и отказ от курения – являются одним из ключевых результатов исследования. Именно поведенческие факторы во многом определяют долгосрочный прогноз у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Полученные данные подтверждают, что мультидисциплинарная модель позволяет перейти от формального информирования пациента к устойчивому изменению его поведения за счёт регулярного контакта с медицинской командой, согласованности рекомендаций и постоянно-го мониторинга.

С организационной точки зрения важным результатом является стопроцентное завершение пациентами программы реабилитации. Это указывает на высокую адаптированность модели к реальным условиям клинической практики и подчёркивает значимость роли медицинской сестры-координатора и врача восстановительной медицины в обеспечении непрерывности процесса. Наличие ответственного координатора снижает риск потери пациента, упрощает навигацию по этапам реабилитации и повышает доверие пациента к системе в целом.

Снижение частоты повторных госпитализаций и сердечно-сосудистых событий в течение шестимесячного наблюдения подтверждает, что мультидисциплинарная модель оказывает влияние не только на промежуточные показатели, но и на клинически значимые исходы. Особенно показательно, что наилучшие результаты отмечены у пациентов с высокой приверженностью рекомендациям, что подчёркивает взаимосвязь между организацией реабилитации, поведением пациента и отдалённым прогнозом.

В совокупности обсуждаемые результаты свидетельствуют о том, что мультидисциплинарная модель кардиореабилитации представляет собой не просто расширенный набор специалистов, а управляемую систему оказания помощи, в которой чётко выстроенные коммуникации, распределение ролей и преемственность этапов являются ключевыми факторами успеха. Именно такая модель позволяет трансформировать реабилитацию из эпизодического вмеша-

тельства в устойчивый процесс восстановления, ориентированный на долгосрочное сохранение функциональной активности и качества жизни пациентов.

Заключение

Результаты проведённого исследования убедительно демонстрируют, что внедрение мультидисциплинарной модели взаимодействия специалистов на этапах реабилитации пациентов с заболеваниями сердечно-сосудистой системы обеспечивает значимое повышение эффективности восстановительного лечения. Разработанная организационная структура, основанная на чётком распределении ролей между кардиологом, врачом восстановительной медицины, специалистом по лечебной физкультуре, психологом, диетологом и координирующим медицинским персоналом, позволила создать целостную и непрерывную систему сопровождения пациента, исключающую фрагментацию медицинской помощи.

Применение данной модели обеспечило выраженное улучшение функционального состояния, что подтверждается увеличением толерантности к физической нагрузке, ростом аэробной работоспособности и снижением тяжести сердечной недостаточности. Существенные позитивные изменения отмечены в качестве жизни и психоэмоциональном состоянии пациентов, что отражает значимость психосоциальной поддержки как обязательного компонента современной кардиореабилитации. Наблюдаемое усиление приверженности медикаментозной терапии, регулярной физической активности и коррекции факторов риска подтверждает формирование устойчивого лечебного поведения, а снижение частоты повторных госпитализаций и сердечно-сосудистых событий указывает на реальное влияние модели на клинический прогноз.

Таким образом, мультидисциплинарная реабилитационная модель может рассматриваться как клинически обоснованный, организационно эффективный и практически реализуемый подход к ведению пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Её внедрение способствует повышению качества медицинской помощи, улучшению исходов и снижению нагрузки на систему здравоохранения. Дальнейшее развитие данного направления следует связывать с расширением масштабов применения модели, стандартизацией процессов взаимодействия специалистов, увеличением сроков наблюдения и выполнением дополнительных исследований, направленных на уточнение отдалённых результатов и экономической эффективности.

Список литературы

1. Демографический ежегодник России. 2021: Стат. сб. / Д 31 Росстат. М., 2022. 256 с. URL: <https://www.demoscope.ru/weekly/2022/0929/biblio02.php> (дата обращения: 15.10.2025).
2. Аронов Д.М., Бубнова М.Г. Проблемы внедрения новой системы кардиореабилитации в России // Российский кардиологический журнал. 2013. № 4 (102). С. 14–22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-vnedreniya-novoy-sistemy-kardioreabilitatsii-v-rossii> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.15829/1560-4071-2013-4-14-22.
3. Бубнова М.Г., Аронов Д.М. Кардиореабилитация: этапы, принципы и международная классификация функционирования (МКФ) // Профилактическая медицина. 2020. № 23 (5). С. 40–49. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/profilakticheskaya-meditsina/2020/5/1230549482020051040> (дата обращения: 17.10.2025). DOI: 10.17116/profmed20202305140.
4. Бубнова М.Г., Аронов Д.М., Красницкий В.Б., Новикова Н.К., Матвеева И.Ф., Иоселиани Д.Г. Комплексная программа медицинской реабилитации после чрескожного коронарного вмешательства при остром инфаркте миокарда у больных // Вопросы кардиологии. 2015. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-programma-meditsinskoy-reabilitatsii-posle-chreskozhnogo-koronarnogo-vmeshatelstva-pri-ostrom-infarakte-miokarda-u-bolnyh> (дата обращения: 17.10.2025).
5. Гальцева Н.В. Реабилитация в кардиологии и кардиохирургии // Клиницист. 2015. Т. 9. № 2. С. 13–22. URL: <https://klinists.abvpress.ru/Klin/article/view/190> (дата обращения: 12.12.2025). DOI: 10.17650/1818-8338-2015-9-2-13-22.
6. Кореннова О.Ю., Приходько Е.П., Юхина Ю.Е., Савченко М.В., Турушева Е.А., Подольная С.П., Друк И.В., Шукиль Л.В., Ряполова Е.А. Клинические аспекты включения пациентов с ишемической болезнью сердца после реваскуляризации миокарда в программу физической медицинской реабилитации на амбулаторном этапе // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2021. № 10 (1). С. 16–25. URL: <https://www.nii-kpssz.com/jour/article/view/813> (дата обращения: 17.10.2025). DOI: 10.17802/2306-1278-2021-10-1-16-25.
7. Timmis A., Townsend N., Gale C.P. European society of cardiology: cardiovascular disease statistics. 2019 // Eur. Heart J. 2020. Vol. 41. № 1. P. 12–85. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31820000/> (дата обращения: 11.10.2025).
8. Боровая Т.В., Захаренко А.Г. Смертность от болезней системы кровообращения в трудоспособном возрасте // Евразийский кардиологический журнал. 2019. С. 1–31.
9. Румянцева С.А., Оганов Р.Г., Силина Е.В., Ступин В.А., Болевич С.Б., Орлова А.С., Кабаева Е.Н., Волик С.А., Сохова О.Н., Кубочкин А.Ю. Сердечно-сосудистая патология при остром инсульте (некоторые аспекты распространенности, профилактики и терапии) // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2014. № 13 (4). С. 47–53. DOI: 10.15829/1728-8800-2014-4-47-53.
10. Baris R.O., Tabit C.E. Heart Failure Readmission Prevention Strategies – A Comparative Review of Medications, Devices, and Other Interventions // J. Clin. Med. 2025. № 14. 5894. DOI: 10.3390/jcm14165894.
11. Новикова И.А., Некрутенко Л.А., Лебедева Т.М., Хлынова О.В., Шишкина Е.А. Пациент после инфаркта миокарда: факторы риска новых сердечно-сосудистых катастроф // Анализ риска здоровью. 2019. № 1. С. 135–143. DOI: 10.21668/health.risk/2019.1.15. URL: <https://journal.fcisk.ru/2019/1/15> (дата обращения: 11.10.2025).
12. Ротарь О.П., Бояринова М.А., Толкунова К.М., Могучая Е.В., Алиева А.С., Орлов А.В., Колесова Е.П., Ерина А.М., Усольцев Д.А., Солнцев В.Н., Баранова Е.И., Конради А.О., Шляхто Е.В. Фенотипы сосудистого старения в российской популяции – биологические и социально-поведенческие детерминанты // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2021. № 20 (5). 2970 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenotipy-sosudistogo-stareniya-v-rossiyskoy-populyatsii-biologicheskie-i-sotsialno-povedencheskie-determinanty> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.15829/1728-8800-2021-2970.
13. Гусейнова Э.Т., Кутишенко Н.П., Лукина Ю.В., Толпыгина С.Н., Воронина В.П., Марцевич С.Ю. Проблема хронической сердечной недостаточности и приверженности медикаментозному лечению: методы оценки и нерешенные вопросы // Клиницист. 2020. Т. 14. № 3–4. С. 18–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-hronicheskoy-serdechnoy-nedostatochnosti-i-priverzhennosti-medikamentoznomu-lecheniyu-metody-otsenki-i-nereshennyye-voprosy> (дата обращения: 15.10.2025).
14. Самородская И.В., Семёнов В.Ю. Потерянные годы потенциальной жизни от болезней системы кровообращения экономически активного населения Российской Федерации в 2013–2019 годах // Российский кардиологический журнал. 2021. № 26 (5). 4161. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poteryannyye-gody-potentsialnoy-zhizni-ot-boleznay-sistemy-krovoobrascheniya-ekonomicheski-aktivnogo-naseleniya-rossiyskoy> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.15829/1560-4071-2021-4161.
15. Eagle K.A., Kline-Rogers E., Goodman S.G., Gurfinkel E.P., Avezum A., Flather M.D., Granger C.B., Erickson S., White K., Steg P.G. Adherence to evidence-based therapies after discharge for acute coronary syndromes: an ongoing prospective, observational study // Am J Med. 2004. № 117(2). P. 73–81. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15234641/> (дата обращения: 18.10.2025). DOI: 10.1016/j.amjmed.2003.12.041. PMID: 15234641.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

СТАТЬИ

УДК 681.518.5:656.25

ИССЛЕДОВАНИЕ БОРТОВОГО МАРШРУТИЗАТОРА НА ОСНОВЕ CAN FD ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СИСТЕМАХ СБОРА ДАННЫХ

²Крылов А.С., ¹Мягкова М.А.

¹*Институт физиологически активных веществ Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, Российская Федерация, e-mail: m.a.myagkova@gmail.com;*

²*ООО «ДИАНАРК», Москва, Российская Федерация*

Современные железнодорожные системы требуют высоконадежных решений для передачи данных. Перспективной технологией для внутривагонных сетей является шина Controller Area Network и ее развитие Controller Area Network Flexible Data Rate. Целью работы являлась комплексная экспериментальная проверка бортового маршрутизатора в условиях, моделирующих железнодорожную эксплуатацию. Задачи включали нагрузочное тестирование, анализ эффективности маршрутизации, климатические и вибрационные испытания, а также диагностику ошибок памяти. Исследование подтвердило, что маршрутизатор стабильно работает на всех заявленных скоростях передачи данных. Нагрузочное тестирование показало сохранение работоспособности при экстремальной нагрузке на шину до 95%. Использование Controller Area Network Flexible Data Rate позволило существенно снизить задержки передачи по сравнению с классическим Controller Area Network. Устройство корректно маршрутизировало трафик в различных режимах без потерь данных. Маршрутизатор продемонстрировал устойчивость в температурном диапазоне от -40 до +70 °С, при высокой влажности и вибрациях. Сточасовой мониторинг не выявил отказов памяти или ошибок контроллера. Полученные экспериментальные данные представляют практическую ценность для разработчиков и обосновывают применение решений на основе Controller Area Network Flexible Data Rate в надежных железнодорожных системах сбора данных.

Ключевые слова: шина CAN, децентрализованная система, железнодорожная инфраструктура, нагрузочное тестирование, маршрутизация трафика, блок шлюза вагона

RESEARCH OF AN ON-BOARD ROUTER BASED ON CAN FD FOR APPLICATION IN RAILWAY DATA ACQUISITION SYSTEMS

²Krylov A.S., ¹Myagkova M.A.

¹*Institute of Physiologically Active Substances Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation, e-mail: m.a.myagkova@gmail.com;*

²*DIANARK LLC, Moscow, Russian Federation*

Modern railway systems require highly reliable data transmission solutions. A promising technology for intra-car networks is the Controller Area Network (CAN) and its evolution, CAN Flexible Data Rate (FD). The aim of this work was a comprehensive experimental validation of an on-board router under conditions simulating railway operation. The tasks included load testing, analysis of routing efficiency, climatic and vibration tests, and memory error diagnostics. The study confirmed that the router operates stably at all declared data rates. Load testing demonstrated maintained functionality even under extreme bus load up to 95%. The use of CAN FD significantly reduced transmission delays compared to classic CAN. The device correctly routed traffic in various modes without data loss. The router demonstrated resilience within a temperature range of -40°C to +70°C, under high humidity and vibration. A 100-hour monitoring period revealed no memory failures or controller errors. The obtained experimental data are of practical value for developers and justify the application of CAN FD-based solutions in reliable railway data acquisition systems.

Keywords: CAN bus, decentralized system, railway infrastructure, load testing, traffic routing, on-board gateway unit

Введение

Современные железнодорожные системы требуют высоконадежных и эффективных решений для передачи данных между вагонами и центральными узлами управления [1; 2]. Одной из перспективных технологий для организации внутривагонных сетей является шина CAN (Controller Area Network) и ее современное развитие – CAN FD (Flexible Data-Rate), обладающая повышенной пропускной способностью и на-

дежностью [3-5]. Однако внедрение CAN FD в железнодорожную инфраструктуру требует тщательной экспериментальной проверки рабочих характеристик ключевых устройств, таких как бортовые маршрутизаторы, в условиях, приближенных к реальным [6; 7]. Блок шлюза вагона (БШВ) является критически важным компонентом, обеспечивающим маршрутизацию информации между подсистемами вагона, включая управление, диагностику, безопасность

[8-10]. На сегодняшний день отмечается недостаток опубликованных экспериментальных данных, подтверждающих стабильность работы (БШВ) в условиях, характерных для железной дороги. К ним относятся экстремальные нагрузки на шину, широкий диапазон температур, вибрации и другие воздействия [6; 11; 12]. Поэтому существует практическая потребность в накоплении и систематизации экспериментальных данных о работе CAN FD-устройств в подобных сложных сценариях. Получение массива экспериментальных данных о поведении CAN FD-устройства в реальных условиях представляет научную ценность для разработчиков и инженеров, работающих над созданием и внедрением надежных систем сбора данных для железнодорожного транспорта. В плане развития указанного направления и пополнения новыми экспериментальными данными актуальным является проведение многопланового исследования, включающего нагрузочное тестирование, климатические испытания и диагностику ошибок, что позволит оценить ключевые эксплуатационные характеристики устройства.

Цель исследования: комплексная экспериментальная проверка бортового маршрутизатора в условиях, моделирующих реальную железнодорожную эксплуатацию. Задачи исследования включали:

- 1) проведение нагрузочного тестирования на различных скоростях передачи данных (CAN/CAN FD);
- 2) анализ эффективности маршрутизации трафика при высокой загрузке шины (до 95%);
- 3) климатические и вибрационные испытания в заданном диапазоне;
- 4) диагностику ошибок энергонезависимой памяти (EEPROM).

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось с использованием бортового маршрутизатора – блока шлюза вагона, предназначенного для маршрутизации данных между подсистемами вагона по шинам CAN и CAN FD [6; 13].

Для тестирования использовался специализированный испытательный стенд, включающий:

- 1) компьютер с программным обеспечением «Сервисный интерфейс» для настройки параметров устройства (скорости, маршрутизации, фильтрации кадров);
- 2) оборудование для генерации и анализа CAN/CAN FD трафика (шлюзы IXXAT NT 420 GATE);
- 3) климатическую камеру для термостабильности;
- 4) вибростенд.

Работа выполнялась в соответствии со следующим протоколом тестирования.

1. Нагрузочное тестирование:

1) проверялась работоспособность устройства на стандартных скоростях CAN (до 1 Мбит/с) и CAN FD (арбитраж – до 1 Мбит/с, фаза данных – до 5 Мбит/с);

2) для оценки производительности генерировался тестовый трафик с идентификаторами в диапазоне 0–200. Нагрузка на шину варьировалась от 50% до 95% за счет управления межкадровыми интервалами;

3) измерялись ключевые метрики: средняя сквозная задержка (end-to-end latency), разброс задержек (джиттер) и процент потерь кадров.

2. Анализ маршрутизации:

1) проверялась корректность работы устройства в различных конфигурируемых режимах («расширение», «дублирование», «независимый») при высокой нагрузке.

3. Климатические и вибрационные испытания:

1) устройство помещалось в климатическую камеру, где подвергалось циклическому воздействию температур в диапазоне от -40 до +70 °C;

2) одновременно с температурными воздействиями применялась вибрационная нагрузка в спектре 5–200 Гц;

3) критерием успешного прохождения испытаний являлось сохранение устройством работоспособности и отсутствие сбоев передачи данных (потерь кадров > 0.1%).

4. Диагностика ошибок:

1) проводился мониторинг состояния энергонезависимой памяти (EEPROM) и регистров ошибок CAN-контроллера в течение 100 часов непрерывной работы.

5. Методология сбора и обработки данных.

Для обеспечения статистической достоверности результатов все количественные испытания (нагрузочное тестирование) проводились в виде серии независимых экспериментов.

Размер выборки: каждое измерение метрик (задержка, джиттер, потери) при заданной нагрузке на шину повторялось 30 раз (N=30). Это позволяет аппроксимировать распределение результатов нормальным законом и применить параметрические методы статистики.

Протокол измерений: перед каждым повторением шина полностью останавливалась и запускалась заново для исключения влияния предыдущих состояний (например, заполненности буферов) на результаты следующего измерения. Это обеспечивало независимость повторений.

Обработка данных: для каждого набора из 30 измерений рассчитывались среднее

арифметическое (Mean) и стандартное отклонение (Standard Deviation, SD). На основе этих данных определялся 95% доверительный интервал (95% Confidence Interval, 95% CI) по формуле:

$$*95\% \text{ CI} = \text{Mean} \pm (t(\alpha/2, N-1) * (SD / \sqrt{N}))^*,$$

где $t(\alpha/2, N-1)^*$ – критическое значение t-распределения Стьюдента для уровня значимости $\alpha=0.05$ и числа степеней свободы $N-1=29$ ($t(0.025, 29) \approx 2.045$).

Статистическая значимость: различия между метриками для CAN и CAN FD считались статистически значимыми, если их доверительные интервалы не пересекались.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований были получены следующие результаты, характеризующие работу бортового маршрутизатора (БШВ).

1. Поддерживаемые скорости передачи данных

Испытания подтвердили, что БШВ стабильно работает на всех заявленных скоростях передачи данных для интерфейсов CAN и CAN FD. Результаты в таблице 1.

2. Производительность при высокой нагрузке

Нагрузочное тестирование, проведенное в соответствии с описанной методологией ($N=30$ для каждой точки нагрузки), показало, что БШВ сохраняет работоспособность даже при экстремальной нагрузке на шину до 95%. Измеренные метрики производительности для нагрузки 90% приведены в таблице 2. Приведенные значения представляют собой среднее арифметическое и 95% доверительный интервал.

Зависимость задержки передачи от нагрузки на шину носит нелинейный характер, что типично для сетей с разделяемой средой. Данные, полученные в серии из $N=30$ независимых измерений для каждой точки нагрузки, представлены в таблице 3.

Данные, представленные в таблицах 2 и 3, наглядно демонстрируют классическую для сетей с разделяемой средой зависимость: с ростом нагрузки до экстремальных значений (85-95%) происходит нелинейное увеличение задержки передачи данных. Это явление объясняется увеличением времени ожидания арбитража в переполненной шине.

Таблица 1

Поддерживаемые скорости передачи данных в интерфейсах CAN и CAN FD

Идентификатор теста	Тип канала	Скорость передачи данных, Кбит/с
T1.3.7	CAN	25
T1.1.6, T1.3.6	CAN FD, CAN	50
T1.1.5, T1.3.5	CAN FD, CAN	100
T1.1.4, T1.3.4	CAN FD, CAN	125
T1.1.3, T1.3.3	CAN FD, CAN	250
T1.1.2, T1.3.2	CAN FD, CAN	500
T1.1.1, T1.3.1	CAN FD, CAN	1000
T1.1.7	CAN FD	5000 (арбитраж) / 5000 (фаза данных)

Примечание: составлено авторами. Тест T1.1.7 демонстрирует ключевое преимущество CAN FD – возможность использования высокой скорости (5 Мбит/с) на фазе передачи данных.

Таблица 2

Измеренные метрики производительности при загрузке шины 90% ($N=30$)

Метрика	CAN (1 Мбит/с)	CAN FD (5 Мбит/с)
Средняя задержка, мс	12.5 ± 3.0	2.1 ± 0.4
Максимальный джиттер, мс	8.7 ± 2.1	1.5 ± 0.3
Потери кадров, %	0.01	0.00
Размер выборки (N)	30	30

Примечание: составлено авторами. Значения задержки и джиттера представлены как среднее \pm 95% доверительный интервал. Процент потерь является фиксированным значением, наблюдаемым в течение всего тестового сеанса. CAN FD демонстрирует статистически значимое превосходство ($p < 0.05$) по всем метрикам задержки.

Таблица 3

Зависимость метрик производительности от нагрузки на шину (N=30)

Нагрузка, %	CAN FD задержка, мс (95% CI)	CAN задержка, мс (95% CI)	Потери CAN FD, %	Потери CAN, %
50	0.7 ± 0.1	4.0 ± 0.5	0.00	0.00
70	1.0 ± 0.2	8.0 ± 1.0	0.00	0.00
85	1.8 ± 0.3	15.0 ± 2.0	0.00	0.001
90	2.1 ± 0.4	12.5 ± 3.0	0.00	0.01
95	3.5 ± 0.8	25.0 ± 5.0	0.001	0.05

Примечание: составлено авторами. Данные представлены как среднее ± 95% доверительный интервал, рассчитанный по 30 независимым повторениям для каждого уровня нагрузки. Наблюдаемый нелинейный рост задержки с увеличением нагрузки статистически подтвержден. Преимущество CAN FD в виде более медленного роста задержки является статистически значимым на всех уровнях нагрузки выше 50%.

Таблица 4

Результаты тестирования сценариев маршрутизации

Сценарий	Условия	Результат
Ретрансляция CAN→CAN FD	4 CAN канала → 2 CAN FD, загрузка >45%	Данные передаются без ошибок
Ретрансляция CAN FD→CAN	2 CAN FD → 2 CAN, загрузка 95%	Корректная конвертация формата
Распределение по 4 CAN	CAN FD → 4 CAN (маска EXT,8)	Равномерная нагрузка

Примечание: составлено авторами. Использовалось оборудование IXXAT NT 420 GATE, количественные потери во всех сценариях не превышали 0.01%.

Качественное преимущество CAN FD проявляется в значительно более медленном росте задержки по сравнению с классическим CAN, особенно в области нагрузок свыше 85%, что подтверждает его эффективность для высоконагруженных систем. При этом процент потерь для обоих протоколов остается пренебрежимо малым вплоть до нагрузки 95%, что свидетельствует о высокой надежности арбитражного механизма CSMA/CA и эффективности буферизации в БШВ.

3. Эффективность маршрутизации

Тестирование различных режимов работы подтвердило, что БШВ корректно маршрутизирует трафик между каналами CAN и CAN FD без потерь данных при нагрузке до 95%. В таблице 4 представлены результаты тестирования ключевых сценариев маршрутизации.

Анализ работы логических интерфейсов в различных режимах показал следующую эффективность:

- в режиме «расширение» трафик успешно распределялся между каналами CANFD1 и CANFD2 по четности ID;

- в режиме «дублирование» обеспечивалась полная копия трафика на оба канала;

- «независимый» режим позволял осуществлять ретрансляцию CAN→CAN FD без разделения.

Тестирование различных режимов работы («расширение», «дублирование», «независимый») подтвердило, что БШВ корректно маршрутизирует трафик между каналами CAN и CAN FD без потерь данных при нагрузке до 95%.

4. Устойчивость к климатическим воздействиям и вибрациям

В ходе испытаний устройство продемонстрировало стабильную работу в условиях, приведенных в таблице 5. Сбоев передачи данных не зафиксировано ни в одном из тестовых циклов.

Результаты испытаний показали:

1) стабильную работу при всех температурах в заданном диапазоне;

2) отсутствие сбоев при комбинированном воздействии высокой влажности и вибраций;

3) сохранение работоспособности после полного цикла температурных испытаний.

Таблица 5

Параметры климатических и вибрационных испытаний

Параметр	Значение	Длительность цикла	Скорость изменения температуры
Температурный диапазон	-40...+70 °С	24 часа	1 °С/мин.
Относительная влажность	95%	12 часов	-
Вибрации (спектр)	5-200 Гц	2 часа на ось	-

Примечание: составлено авторами.

В ходе испытаний устройство продемонстрировало стабильную работу в заданном диапазоне температур (-40...+70 °С) при относительной влажности 95% и под воздействием вибраций в спектре 5-200 Гц. Сбоев передачи данных не зафиксировано.

5. Диагностика ошибок

Мониторинг состояния EEPROM и регистров ошибок CAN-контроллера в течение 100 часов непрерывной работы не выявил критических отказов или зафиксированных ошибок передачи.

Мониторинг состояния систем устройства в течение 100 часов непрерывной работы показал следующие результаты.

Энергонезависимая память (EEPROM):

- не выявлено критических отказов;
- целостность критических параметров устройства сохранена;
- встроенные self-test алгоритмы не зафиксировали ошибок.

CAN-контроллер:

- в регистрах ошибок (ECC и REC) не зафиксировано: битовых ошибок; ошибок формата кадров; АСК-ошибок;
- счетчики ошибок оставались нулевыми на протяжении всего тестового цикла.

Такие результаты свидетельствуют о высокой надежности устройства и корректной работе механизмов контроля ошибок.

Результаты исследования и их обсуждение

Для проверки устойчивости БШВ к высоким нагрузкам необходимо разрабатывать специализированные системы тестирования. В работе был использован подход на основе децентрализованной CAN-сети, обеспечивающей гибкость, масштабируемость и отказоустойчивость [14; 15]. Проведено исследование, позволяющее получить новые данные для оценки работоспособности бортового маршрутизатора в условиях, моделирующих железнодорожную эксплуатацию. Предложенный подход является комплексным, т.к. сочетает нагрузочные, климатические и диагностические тесты, охватывая все критические аспекты работы БШВ. При испытании

производительности и нагрузки получены данные о нелинейном росте задержки с увеличением нагрузки, подтвержденные серией из N=30 независимых экспериментов для каждой точки, что полностью соответствует ожидаемому поведению сетей CAN, основанных на арбитраже CSMA/CA [5; 6]. Статистически значимое преимущество CAN FD по задержке и джиттеру (табл. 2, 3), где доверительные интервалы для двух технологий не пересекаются, однозначно подтверждает целесообразность его применения в высоконагруженных системах, где критичным является время отклика. Важным практическим результатом стало подтверждение работоспособности БШВ без существенных потерь данных (менее 0.01%) при статистически достоверно измеренной нагрузке до 95%.

Проведенное исследование надежности и устойчивости продемонстрировало успешное прохождение климатических и вибрационных испытаний, свидетельствующее о том, что конструкция устройства и применяемая элементная база обеспечивают необходимый запас прочности для работы в жестких условиях железнодорожного транспорта. Стабильность работы энергонезависимой памяти и отсутствие зарегистрированных ошибок контроллера за 100 часов теста указывают на высокую надежность устройства. В исследовании установлена гибкость конфигурации. Так, поддержка различных режимов маршрутизации позволяет гибко адаптировать БШВ под конкретные задачи системы сбора данных, обеспечивая как отказоустойчивость (режим «дублирование»), так и эффективное распределение нагрузки (режим «расширение»).

Следует отметить, что проведенные испытания охватывают ключевые, но не все возможные условия эксплуатации. Поэтому планируется дальнейшие исследования направить на испытания в условиях специфических электромагнитных помех, характерных для контактной сети, а также на более длительные ресурсные испытания.

Важно отметить, что полученный на данном этапе массив экспериментальных данных и разработанная методика тестиро-

вания представляют научно-практическую ценность для исследователей и инженеров, занимающихся внедрением CAN FD-систем в железнодорожной отрасли. Результаты работы могут быть использованы в качестве дополнительного обоснования при выборе сетевых технологий для модернизации парка подвижного состава.

Заключение

Проведенное комплексное экспериментальное исследование позволило всесторонне оценить работоспособность бортового маршрутизатора на основе шин CAN/CAN FD в условиях, моделирующих железнодорожную эксплуатацию. Так, подтверждено соответствие заявленным характеристикам: устройство стабильно функционирует на всех декларированных скоростях передачи данных: от 25 Кбит/с для CAN до 5 Мбит/с для CAN FD. Установлены количественные показатели производительности: при экстремальной нагрузке на шину до 95% БШВ обеспечивает передачу данных без потерь. Показано, что использование CAN FD позволяет существенно снизить задержки передачи (до 2.1 мс при 90% нагрузки) по сравнению с классическим CAN (12.5 мс при тех же условиях). Доказана эффективность маршрутизации: устройство корректно работает в различных конфигурируемых режимах («расширение», «дублирование», «независимый»), обеспечивая гибкость при построении сетевой инфраструктуры. Подтверждена устойчивость к внешним воздействиям: БШВ сохраняет полную работоспособность в широком диапазоне температур (-40...+70 °C), при высокой влажности (95%) и вибрационных нагрузках (5-200 Гц). Продемонстрирована высокая надежность: в ходе длительного (100 часов) непрерывного тестирования не зафиксировано отказов энергонезависимой памяти (EEPROM) и ошибок на уровне CAN-контроллера. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные новые экспериментальные данные и апробированная методика тестирования предлагает обоснованные аргументы для выбора и внедрения CAN FD-решений в современных и перспективных железнодорожных системах сбора данных. Ключевые преимущества БШВ – устойчивость к экстремальным нагрузкам, неблагоприятным климатическим условиям и гибкость конфигурации – делают его перспективным компонентом для интеграции в инфраструктуру подвижного состава.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Список литературы

1. Жаркова Е.А. Системные аспекты развития железнодорожного транспорта на основе информационных технологий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения: Гуманитарные исследования. 2018. № 1 (3). С. 10–14.
2. Котенко И.В., Левшун Д.С., Чечулин А.А., Ушаков И.А., Красов А.В. Комплексный подход к обеспечению безопасности киберфизических систем на системе микроконтроллеров // Вопросы кибербезопасности. 2018. № 3 (27). С. 29–38. DOI: 10.21681/2311-3456-2018-3-29-38.
3. Мелешко А.В., Десницкий В.А. Моделирование самоорганизующейся децентрализованной беспроводной сенсорной сети с ролевым функционированием для решения задач обнаружения атак // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2023. № 3. С. 63–69. DOI: 10.46418/2079-8215-2023-3-63-69.
4. ISO 11898:1993 Road vehicles – Interchange of digital information – Controller area network (CAN) for high-speed communication [ISO 11898-1:2015 Дорожные транспортные средства. Сеть контроллеров (CAN). Часть 1: Канальный уровень и физический кодирование]. URL: <https://www.iso.org/standard/20380.html> (дата обращения: 26.12.2024).
5. Knezic M., Dokic B., Ivanovic Z. Reliability Assessment of CAN Networks in Industrial Environments // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 124567–124579. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3111234.
6. Conti M., Donadel D., Turrin F. A survey on industrial control system testbeds and datasets for security research // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2021. Vol. 23. № 4. P. 2248–2294. DOI: 10.1109/COMST.2021.3096794.
7. Ефанов Д.В. Система мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе промышленного «Интернета вещей» // Мир транспорта 2020. № 18 (6). С. 118–134. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-6-118-134.
8. Xia F., Chen X., Yu S., Hou M., Liu M., You L. Coupled attention networks for multivariate time series anomaly detection // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2024. Vol. 36. № 3. P. 1129–1141. DOI: 10.1109/TKDE.2023.3326194.
9. Крылов А.С., Мягкова М.А. Сравнительное исследование методов построения децентрализованных систем сбора данных // Вестник науки. 2025. Т. 3. № 4 (85). С. 787–793. DOI: 10.24412/2712-8849-2025-4-787-793.
10. Zhou L., Zhang W., Chen X., Li H. Energy-Efficient CAN-Based Industrial IoT Networks // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9. № 4. P. 2567–2578. DOI: 10.1109/IJOT.2022.3142312.
11. Лакин И.К., Павлов В.В., Мельников В.А. «Умный локомотив»: диагностирование тяговых электродвигателей тепловозов с использованием методов машинного обучения // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 1 (74). С. 53–56. URL: <http://rostransport.com/transportrf/pdf/74/1994-831X-2018-1-53-56.pdf> (дата обращения: 21.09.2025).
12. Farrell J., Barth M. Comparative Analysis of CAN Bus and CANopen Performance in Automotive Applications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69. № 6. P. 5892–5901. DOI: 10.1109/TVT.2020.2987423.
13. Kribel A., Saenko I., Kotenko I. Detection of Anomalies in the Traffic of Information and Telecommunication Networks Based on the Assessment of its Self-Similarity // Proceedings of the 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2020. P. 713–718. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208147.
14. CAN in Automation (CiA). CANopen Application Layer and Communication Profile (CiA 301 Version 4.2.0) [Уровень приложений и коммуникационный профиль CANopen]. Nuremberg, Germany: CAN in Automation, 2021. ISBN: 978-3-9817129-6-3.
15. Горелик А.В., Дорохов В.С., Орлов А.В., Скрипниченко И.Г., Шерстюков О.С. Особенности применения информационных систем для управления инфраструктурным комплексом железнодорожного транспорта // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6-2. С. 228–233. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=38097> (дата обращения: 11.08.2025). DOI: 10.17513/snt.38097.

УДК 532.5:66.067.3:519.6

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ МНОГОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННОМ ФЛОТАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Сергиянский Е.В. ORCID ID 0000-0003-2404-6241

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Мурманский арктический университет», Апатиты, Российская Федерация,
e-mail: sls_sls30@rambler.ru*

Статья посвящена разработке модели вычислительной гидродинамики многофазного течения в комбинированном флотационном аппарате для очистки сточных вод. Целью исследования являлось создание достоверной расчетной модели, пригодной для анализа и оптимизации гидродинамических режимов данного оборудования. В работе рассмотрены системы автоматизированного проектирования (SolidWorks, Autodesk Fusion 360, Компас-3D, AutoCAD, Gambit) для подготовки геометрии и генерации расчетной сетки. Для реализации гидродинамических расчетов в ANSYS Fluent определен Gambit, как самый универсальный инструмент для задания условий однозначности модели. Представлена методика построения параметрической трехмерной модели рабочей зоны флотатора с детализированным описанием этапов предпроцессорной подготовки: создания гибридной тетраэдральной сетки с адаптацией в зонах интенсивного перемешивания, а также задания граничных и начальных условий. Для моделирования многофазного потока использован эйлеров подход, где вода является основной фазой, а воздух – вторичной. Турбулентность описана с помощью стандартной модели $k - \epsilon$. Результатом исследования является готовая к проведению вычислительных экспериментов модель, которая позволяет изучать распределение скоростей, концентраций фаз и градиентов давления в аппарате. Разработанная модель служит основой для последующего анализа и интенсификации процесса флотационной очистки.

Ключевые слова: комбинированный флотационный аппарат, Gambit, граничные условия, геометрия, генерация сетки, CFD-модель, ANSYS Fluent

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL OF A MULTIPHASE FLOW IN A COMBINED FLOTATION APPARATUS

Sergiyanskiy E.V. ORCID ID 0000-0003-2404-6241

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Murmansk Arctic University”, Apatity, Russian Federation,
e-mail: sls_sls30@rambler.ru*

The article is devoted to the development of a computational fluid dynamics model for multiphase flow in a combined flotation device for wastewater treatment. The aim of the study was to create a reliable computational model suitable for analyzing and optimizing the hydrodynamic modes of this equipment. The paper considers computer-aided design systems (SolidWorks, Autodesk Fusion 360, Compass-3D, AutoCAD, Gambit) for geometry preparation and computational grid generation. To implement hydrodynamic calculations in ANSYS Fluent, Gambit is defined as the most versatile tool for setting the conditions for unambiguity of the model. A technique is presented for constructing a mixing, as well as setting boundary and initial conditions. The Eulerian approach is used to model a multiphase flow, where water is the main phase and air is the secondary phase. Turbulence is described using the standard $k - \epsilon$ model. The result of the study is a model ready for computational experiments, which allows us to study the distribution of velocities, phase concentrations, and pressure gradients in the apparatus. The developed model serves as the basis for the subsequent analysis and intensification of the flotation purification process.

Keywords: combined flotation device, Gambit, boundary conditions, geometry, grid generation, CFD-model, ANSYS Fluent

Введение

Математическое моделирование интенсивно совершенствуется и успешно внедряется в разнообразные сферы деятельности – от проектирования технических устройств до исследования сложных социально-экономических процессов [1]. Интенсификация процесса очистки промышленных сточных вод также может реализовываться посредством применения современных программ, предназначенных для компьютерного моделирования [2; 3]. Благодаря применению

таких инструментов стало возможным анализировать работу таких аппаратов, усовершенствовать режимы их работы.

Постановка задачи математического моделирования подразумевает четкую последовательность шагов, предложенную, например, А.А. Самарским [4, с. 7]. Для реализации более точного и реалистичного моделирования необходимо правильно подобрать программную среду, в которой будет осуществляться построение геометрии исследуемого аппарата, задание граничных условий, а также генерироваться сеточная модель.

Цель исследования – провести сравнительный анализ специализированных программных инструментов, используемых для разработки трехмерных моделей, совместимых с системами автоматизированного инженерингового анализа и вычислений, что потребовало создать рабочую расчетную модель, подходящую для последующего использования в комплексных инженерных исследованиях.

Материалы и методы исследования

Один из способов интенсификации очистки сточных вод – использование комбинированных флотационных аппаратов, предложенных Б.С. Ксенофоновым [5, с. 49–76; 6; 7]. Сочетание различных методов флотации в одном устройстве позволяет получить высокую степень очистки воды от различных загрязняющих веществ. Принцип их работы отличается, но основан на использовании процесса флотации.

Для модернизации различных конструкций флотатора комбинированного действия посредством компьютерного моделирования в первую очередь необходимо проанализировать различные программные инструменты, которые позволят достаточно точно воспроизвести гидродинамику в флокомбайне, как один из основных критериев успешного протекания флотационной очистки.

Можно выделить три ключевые системы, необходимые для полноценного моделирования любых изделий и процессов на персональном компьютере:

1. CAD (Computer-Aided Design) – предназначено для конструирования двух- и трехмерных моделей продукции и составных частей изделия на компьютере.

2. CAM (Computer-Aided Manufacturing) – служит для формирования управляющих команд для станков и оборудования, автоматизирует производственные процессы на основе готовых 3D-моделей, полученных в CAD-среде.

3. CAE (Computer-Aided Engineering) – охватывает область анализа и симуляционного тестирования конструктивных и технологических аспектов. Включает расчеты прочности, теплового режима, гидравлических характеристик и другие виды инженерного анализа.

Для осуществления компьютерного моделирования был выбран ANSYS Fluent, как один из наиболее распространенных программных продуктов в области вычислительной гидродинамики [8; 9]. Реализация достоверных результатов также зависит от правильной настройки аппарата и в CAD-редакторе.

Были проанализированы основные инструменты для двух- и трехмерных моделей,

такие как SolidWorks, Autodesk Fusion 360, AutoCAD [10–12]. Также рассмотрена отечественная система автоматизированного проектирования Компас-3D [13] и Gambit, как программа, разработанная компанией Fluent Inc [14]. Вопрос о создании компьютерной геометрии рассматривался с точки зрения генерации расчетной сетки, задания граничных условий, а также интеграции в ANSYS Fluent.

Результаты исследования и их обсуждение

Для визуализации комбинированного флотационного аппарата в трехмерном формате используем Autodesk Fusion 360, как один из самых гибких и мощных инструментов для проектирования инженерных конструкций (рис. 1).

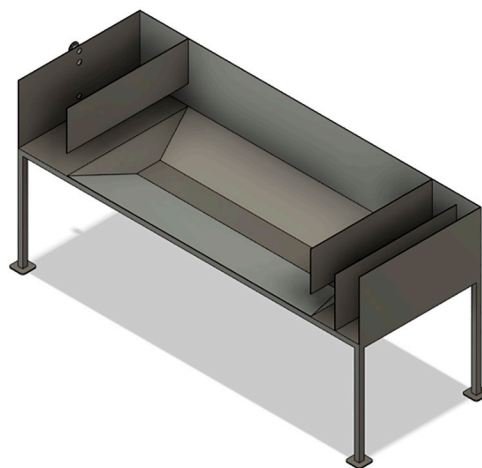


Рис. 1. Визуализация исследуемого флотатора комбинированного действия
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Чтобы реализовать математическое моделирование процесса флотации, важно провести серию вычисленных экспериментов. Полученные данные позволят детально изучить поведение среды в аппарате, включая распределение скоростей водных потоков и водовоздушной смеси, распределение фазы воздуха и градиенты скоростей. Основная задача состоит в построении точной геометрической модели рабочей зоны устройства, необходимой для последующего анализа в программе ANSYS Fluent. Геометрия создается с использованием специализированного CAD редактора Gambit, позволяющего точно задать конфигурацию и детали проектируемого аппарата. Этот этап является ключевым для успешного проведения последующих расчетов и обеспечивает точность полученных результатов.

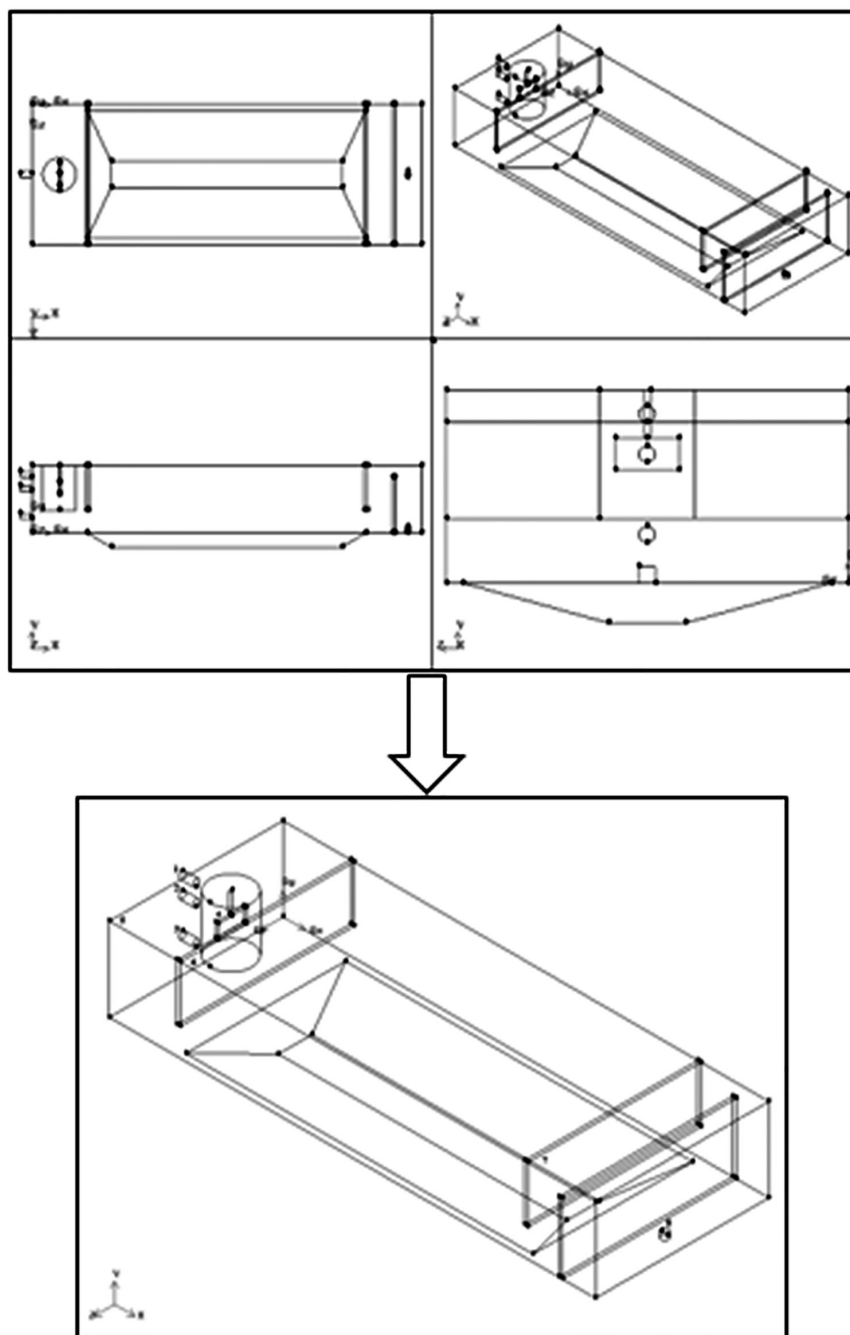


Рис. 2. Геометрия рабочей области исследуемой модели
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Флотатор комбинированного типа оснащен рабочим объемом, представляющим собой специальную полость, заполненную водой в качестве основной среды.

Габариты разработанной модели составляют: ширина – 0,25 м, длина – 0,702 м, а высота колеблется от 0,12 до 0,145 м в разных участках конструкции (рис. 2).

Общая вместимость аппарата достигает 0,0222 м³.

Для того, чтобы обеспечить корректное численное решение в ANSYS Fluent, были заданы необходимые условия однозначности разработанной модели. В редакторе Gambit следующие граничные условия:

1. Вход давления (pressure inlet) и выход давления (pressure outlet) определяются перед началом вычислительного эксперимента либо могут быть скорректированы в процессе расчета.

2. Интерфейс (interface) связывает зону вращения перемешивающего устройства (представлено в виде прямоугольного элемента размерами 0,02 (высота) \times 0,04 (длина) \times 0,002 (ширина)) с основной моделью.

3. Стенка (wall) ограничивает рабочую область, внутри которой определяются основные зависимости.

Основное объемное условие – флюид (fluid).

При разработке модели флотационного аппарата в CAD-программе была создана специальная расчетная сетка, состоящая из тетраэдральных элементов. Такая структура сетки обусловлена особенностями геометрии устройства и необходимостью обеспечить высокую точность вычислений.

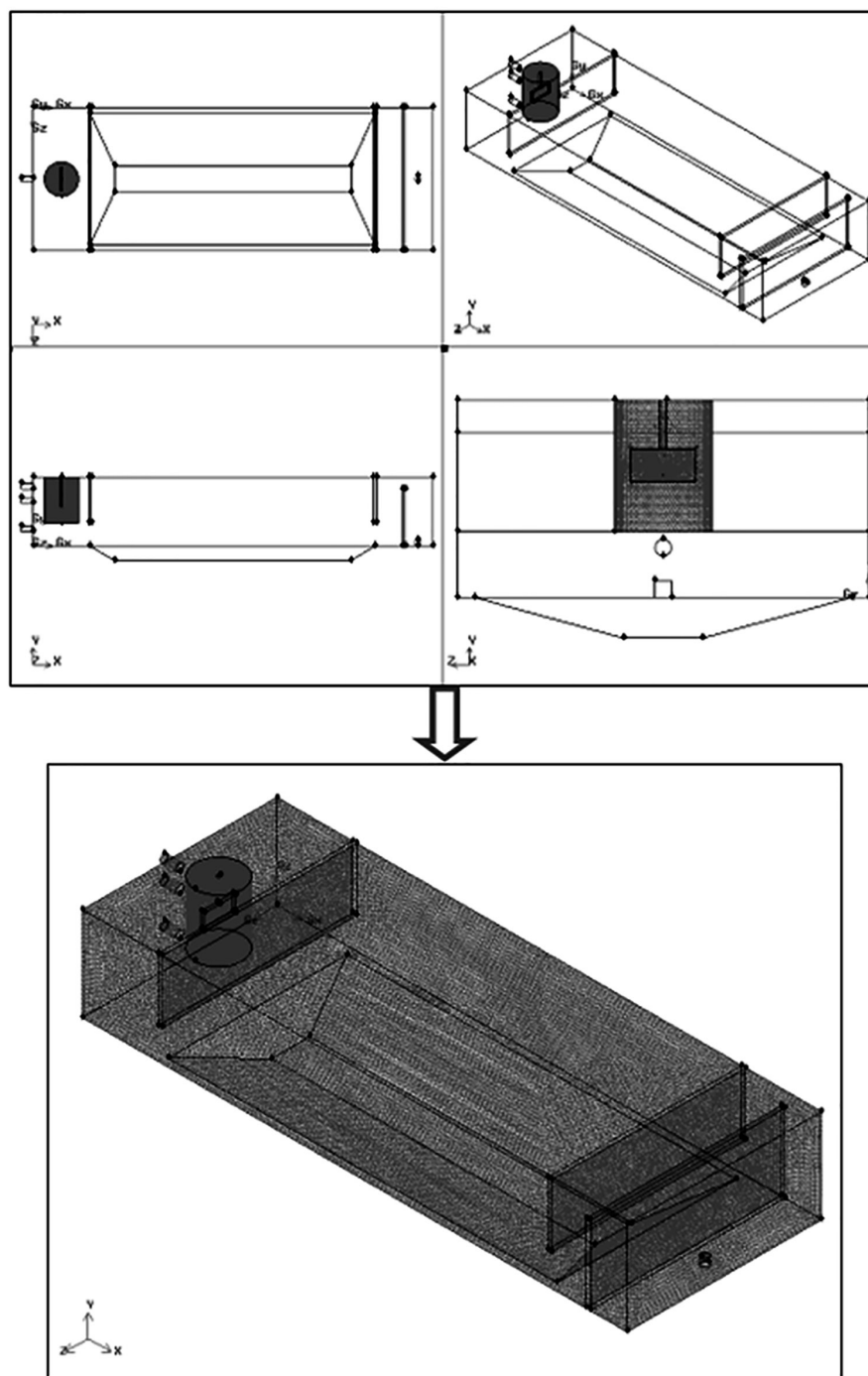


Рис. 3. Расчетная сетка исследуемой модели

Примечание: составлен автором по результатам исследования

Особое внимание уделено зонам интенсивного перемешивания, где плотность сетки увеличена. Размер ячейки здесь составляет всего 0,002 м. Количество элементов в этой части модели достигло 185 508 штук. В остальных областях аппарата используются элементы большего размера – 0,0052 м. Их общая численность составила 939 954 единицы. Такой подход позволяет снизить нагрузку на вычислительную технику, сохраняя при этом достаточную степень точности моделирования даже в менее критичных зонах. Суммарное число тетраэдральных элементов всей расчетной сетки составило 1 125 462 элемента (рис. 3).

Для дальнейшей обработки в пакете CFD (computational fluid dynamics)-анализа ANSYS Fluent экспортируется в специальном формате MESH (*.msh), так как он оптимален для передачи сеточных данных между разными программами и поддерживает интеграцию с широким спектром моделей турбулентности, граничных условий и методов решения уравнений Навье – Стокса.

Процесс математического моделирования многофазного течения в рамках предложенной модели осуществляется посредством эйлеровского подхода [15]. Вода служит главной фазой, тогда как воздух играет роль второстепенного компонента. Поскольку воздушные пузырьки имеют незначительный размер (порядка 100 мкм), применима модель идеального газа, исключаящая эффекты коалесценции. Объемная концентрация воздуха, поступающего через единственную точку входа, установлена равной 0,05 от общего расхода.

Учитывая небольшой диаметр впускных отверстий, высокие значения начальных скоростей, а также наличие специального перемешивающего устройства, выбрана классическая двухпараметрическая $k - \varepsilon$ модель турбулентности, соответствующая числу Рейнольдса, примерно равному 75 000. Начальные условия предполагают подачу давления в систему, соответственно абсолютное давление устанавливается на уровне 0,2–0,25 от нормального атмосферного. Скорость вращения мешалки принята равной 3 об./с (угловая скорость 18,84 рад/с). Ускорение свободного падения установлено по вертикальной оси Y и имеет значение 9,81 м/с². Расчеты проводятся пошагово, причем каждый временной интервал длительностью 0,01 с требует 20 итераций.

Данные параметры обеспечивают адекватное описание реальных гидродинамиче-

ских явлений, протекающих в комбинированном флотационном аппарате, и приближают виртуальную модель к характеристикам реального устройства.

Таким образом, разработанная компьютерная модель станет платформой для проведения вычислительных экспериментов в программном комплексе ANSYS Fluent. Результаты численного моделирования в дальнейшем необходимы как основа для усовершенствования флотатора комбинированного действия.

Заключение

Работа посвящена исследованию и созданию математической модели флотокомбайна, используемого для эффективной очистки сточных вод. Проведенное исследование позволило разработать эффективную модель комбинированного флотационного аппарата, которая должна воспроизводить гидродинамические режимы рабочего объема устройства. В исследовании определены программные продукты, необходимые для реализации инженерных расчетов. Определена оптимальная расчетная сетка, условия однозначности, обеспечивающие достоверность моделирования. Результат данного исследования стал основой для будущих научных работ и практических приложений в сфере охраны окружающей среды.

Список литературы

1. Александрова Е.В. Математическое моделирование как наука // Аграрный сектор экономики России: опыт, проблемы и перспективы развития: материалы всероссийской (национальной) научной конференции (г. Орел, 26 июня 2020 г.) / Науч. ред. Е.В. Бураева. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина. 2020. С. 367–370. EDN: NOVFTC.
2. Дуйсебекова К.С., Дузбаев Н.Т., Аманжолова С.Т. Формализация задачи экологического мониторинга и выбор модели // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. 2019. Т. 16. № 3. С. 95–102. URL: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/258> (дата обращения: 22.12.2025).
3. Атаева Д.А. Численные методы как основа математического моделирования и вычислительных технологий // Наука и мировоззрение. 2025. Т. 1. № 64. С. 136–141. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennyye-metody-kak-osnova-matematicheskogo-modelirovaniya-i-vychislitelnyh-tehnologiy/viewer> (дата обращения: 22.12.2025).
4. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М., 2002. 320 с. URL: http://lib.yu.am/disciplines_bk/98915d7ec85c9361cf1f6339cf201de0.pdf (дата обращения: 20.12.2025). ISBN 978-5-9221-0120-2.
5. Ksenofontov B. Flotation Multistage and Generalized Models of the Process Harvesters of Ksenofontov Type and for Special Purpose. London: Academus Publishing, 2021. 299 p. DOI: 10.31519/0022-8. EDN: HBWWYN. ISBN 978-1-4946-0022-8.
6. Ксенофонтов Б.С. Очистка сточных вод: многостадийная модель флотации и флотокомбайны // Водоочистка. 2018. № 12. С. 5–21. EDN: VTMJTY.

7. Ксенофонов Б.С., Козодаев А.С., Таранов Р.А., Виноградов М.С. Флотокомбайн для очистки сточных вод // Кадры инновационного развития. 2022. № 2. С. 49–57. DOI: 10.18698/jpcid.2022.2.49-57.
8. Сергиянский Е.В. CFD-моделирование гидродинамики комбинированных флотационных аппаратов для очистки сточных вод // Нефть и газ: опыт и инновации. 2025. Т. 9. № 2. URL: <https://nigaz.ru/wp-content/uploads/2025/05/CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ-ГИДРОДИНАМИКИ-КОМБИНИРОВАННЫХ-ФЛОТАЦИОННЫХ-АППАРАТОВ-ДЛЯ-ОЧИСТКИ-СТОЧНЫХ-ВОД.pdf> (дата обращения: 04.01.2026).
9. Чернов А.А. Моделирование гидродинамики потока жидкости с абразивными частицами в технологическом трубопроводе с использованием ПК «ANSYS» // Аллея науки. 2018. Т. 4. № 5 (21). С. 109–113. EDN: USYUIK.
10. Зуев Е. Преимущества трехмерного моделирования в среде SOLIDWORKS // САПР и графика. 2020. № 3 (281). С. 60–61. EDN: WJGEEL.
11. Долова А.А., Константиныди А.Ю., Траоре Д.О. Основы 3D моделирования с применением САПР Autodesk Fusion 360 // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 10 (27). С. 6. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-10-389.
12. Свищев А.В., Хоркина А.А. Целесообразность применения AUTOCAD для автоматизированного проектирования // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 46. С. 909–913. EDN: GCDOAP.
13. Ульянова Н.Д., Танасогло Д.В. Обзор программных продуктов 3D-моделирования // Инновационное развитие предпринимательской деятельности региона: сборник статей международной научно-практической конференции (г. Брянск, 25 ноября 2021 г.). Брянск: Брянский институт управления и бизнеса, 2021. С. 37–43. EDN: PLJQQH.
14. Зиганшин А.М., Логачев А.А., Посохин В.Н. Валидация компьютерной модели течения в вытяжном и приточном симметричных вентиляционных тройниках // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 1 (55). С. 58–70. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/validatsiya-kompyuternoy-modeli-techeniya-v-vytyazhnom-i-pritochnom-simmetrichnyh-ventilyatsionnyh-troynikah/viewer> (дата обращения: 27.12.2025).
15. Рулева Н.Ю., Солбаков В.В. Экологическое моделирование и эйлеров подход, примеры расчетов // Исследование операций (модели, системы, решения). 2020. Т. 6. С. 70–82. DOI: 10.14357/ORMSS20200109. EDN: MFFHAK.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.