

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Издается с января 2002 года
Периодичность издания –
один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 24 / No 2 / 2025

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика

- Гулай А. В., Зайцев В. М.**
Организация процессов решения
функциональных задач
в мультиагентных системах 87

Машиностроение и машиноведение

- Анисович А. Г., Бухаров С. Н., Меринов В. К.,
Сергиенко В. П.**
Влияние магнитного поля на структуру
полимерных медьсодержащих композитов
для узлов стационарного трения 98
- Королёв А. Ю.**
Влияние анодных режимов обработки
в электролитах на съем металла
и выход по току 109

CONTENTS

Informatics

- Gulay A. V., Zaitsev V. M.**
Organization of Processes
for Solving Functional Problems
in Multi-Agent Systems 87

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Anisovich A. G., Bukharov S. N., Merinov V. K.,
Sergienko V. P.**
Effect of Magnetic Field on Structure
of Copper-Containing Polymer Composites
for Stationary Friction Units 98
- Korolyov A. Yu.**
Effect of Anodic Treatment Modes
in Electrolytes on Metal Removal
and Current Efficiency 109

Механика деформируемого твердого тела

Босаков С. В.
 Применение балочных функций
 для статического расчета изгибаемых стержней
 и прямоугольных плит 118

Строительство

Барсуков В. Г., Лежава А. Г., Евсеева Е. А.
 Напряжения в композитной строительной
 арматуре, обусловленные различиями
 коэффициентов Пуассона 124

Чернован Н. В.
 Оценка технического состояния кровель
 крупнопанельных жилых зданий,
 возведенных в Беларуси до 1993 г. 134

Транспорт

**Le Van Nghia, Tran Trong Dat, Dam Hoang Phuc,
 Kharytonchyk S. V., Kusyak V. A.**
 Research on Truck Active Suspension Systems
 Effectiveness with Auxiliary Hydraulic Cylinders
 (Ле Ван Нгиа, Чан Чонг Дат, Дам Хоанг Пхук,
 Харитончик С. В., Кусяк В. А.
 Исследование эффективности активной
 подвески грузового автомобиля
 со вспомогательными гидравлическими
 цилиндрами) 143

Экономика промышленности

Jun Li, Yaozhen Wang, Zhudro M. K.
 MATE Analysis on the Study of Transportation
 Methods in Green Energy Trade
 (Цзюнь Ли, Яожэнь Ван, Жудро М. К.
 Анализ МАТЕ по изучению методов
 транспортировки в торговле «зеленой» энергией) ... 152

Deformation in Solid Mechanics

Bosakov S. V.
 Application of Beam Functions
 for Static Calculation of Bending Rods
 and Rectangular Plates 118

Civil and Industrial Engineering

Barsukov V. G., Lezhava A. G., Evseeva E. A.
 Stresses in Composite Building
 Reinforcement due to Differences
 in Poisson's Ratios 124

Chernoivan N. V.
 Assessment of the Technical Condition
 of Roofs of Large-Panel Residential Buildings
 Erected in Belarus before 1993 134

Transport

**Le Van Nghia, Tran Trong Dat, Dam Hoang Phuc,
 Kharytonchyk S. V., Kusyak V. A.**
 Research on Truck Active Suspension Systems
 Effectiveness with Auxiliary Hydraulic Cylinders 143

Economy in Industry

Jun Li, Yaozhen Wang, Zhudro M. K.
 MATE Analysis on the Study of Transportation
 Methods in Green Energy Trade 152

Главный редактор
Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*), заместитель главного редактора,
- Леонович С. Н.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*), заместитель главного редактора,
- Шелег В. К.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*), заместитель главного редактора,
- Белый А. В.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*),
- Бисби Л.** (*Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии*),
- Виттманн Ф. Х.** (*Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация*),
- Дидерихс У.** (*Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия*),
- Дмитриев С. М.** (*Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация*),
- Згуровский М. З.** (*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*),
- Кондерс А. Б.** (*Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия*),
- Косёр-Казберук М.** (*Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша*),
- Лю Тингуо** (*компания «Гаююань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика*),
- Макнами Р. Я.** (*Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция*),
- Максаров В. В.** (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация*),
- Нгуен Тху Нга** (*Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам*),
- Одиназода Х. О.** (*Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан*),
- Опяляк М.** (*Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша*),
- Пенязьков О. Г.** (*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*),

Editor-in-Chief
Sergei V. Kharytonchyk

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*), Deputy Editor-in-Chief,
- Leonovich S. N.** (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*), Deputy Editor-in-Chief,
- Sheleg V. K.** (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*), Deputy Editor-in-Chief,
- Byeli A. V.** (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
- Bisby L.** (*University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland*),
- Wittmann F. H.** (*ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation*),
- Diederichs U.** (*University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany*),
- Dmitriev S. M.** (*Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation*),
- Zgurovsky M. Z.** (*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*),
- Koenders A. B.** (*Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany*),
- Kosior-Kozberuk M.** (*Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland*),
- Liu Tingguo** (*Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China*),
- McNamee R. J.** (*Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden*),
- Maksarov V. V.** (*Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation*),
- Nguyen Thu Nga** (*Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam*),
- Odinazoda H. O.** (*Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan*),
- Opielak M.** (*Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland*),
- Penyazkov O. G.** (*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*),

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),
Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),
Романюк Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотины, Греческая Республика),
Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),
Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),
Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),
Хрусталеv Б. М. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Чжао Ци (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижик С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Ши Ли И (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),
Эберхардштайнер Й. (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),
Янковский А. (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

Pimienta P. (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),
Rodrigues J. P. C. (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),
Romaniuk F. A. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Sideris K. (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),
Sobolev K. (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),
Sumrov V. V. (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),
Felicetti R. (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),
Khroustalev B. M. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),
Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
Shi Li Yi (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),
Eberhardsteiner J. (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),
Jankowski A. (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий научный редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 31.03.2025. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 9,45. Тираж экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 3820000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2025

Lead Science Editor

V. N. Guryanichyк

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
http://sat.bntu.by

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-87-97>

УДК 681.5.09

Организация процессов решения функциональных задач в мультиагентных системах

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Гулай¹⁾, В. М. Зайцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. При разработке технологий управления производственно-техническими системами наблюдается тенденция к использованию принципов мультиагентности, которые отражают развитие системной концепции распределенной обработки вещества, энергии и информации. Для выполнения работ и решения целевых функциональных задач в мультиагентных системах предполагается задействование параллельно функционирующих системных объектов, которые в определенной мере наделяются субъектными правами и играют роль исполнительных агентов. За счет введения компонентов интеллектуального управления составными частями проектируемой системы реализуются процессы их индивидуального и группового функционирования. С учетом этого в статье проанализированы основные схемы организации процессов решения функциональных задач и предложены показатели эффективности применения мультиагентных технологий. В частности, рассмотрен вариант решения несвязанных системных задач с использованием однотипных исполнительных агентов. Показана возможность применения однотипных агентов для решения многовариантных задач с последующим получением консолидированных результатов. Приведен также вариант предварительной декомпозиции задач на отдельные логически завершенные фазы и дальнейшего получения агрегированного результата. Представлен подход к решению функциональных задач на основе конвейерной параллельно-последовательной реализации их отдельных стадий и последующего отбора адекватного результата. В качестве показателей эффективности применения мультиагентных технологий к решению системных задач предложены и проанализированы характеристики, основанные на оценке времени и вероятности получения корректных результатов. Так, группа показателей, характеризующих процесс решения, включает общее время выполнения задач группой агентов, а также коэффициент компрессии в виде отношения среднего значения времени одноагентного последовательного решения набора задач к нормативному времени их мультиагентного исполнения. Рассматриваемый процесс характеризуется также расчетной вероятностью обеспечения необходимого множества решений за заданное нормативное время и вероятностью получения множества корректных результатов при многократном параллельном решении задачи с использованием группы агентов.

Ключевые слова: принцип мультиагентности, распределенная система, интеллектуальное управление, исполнительный агент, коллективное поведение, декомпозиция задач, синхронизация действий, агрегированный результат, коэффициент компрессии

Для цитирования: Гулай, А. В. Организация процессов решения функциональных задач в мультиагентных системах / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 87–97. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-87-97>

Organization of Processes for Solving Functional Problems in Multi-Agent Systems

A. V. Gulay¹⁾, V. M. Zaitsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. When developing technologies for managing production and technical systems, there is a tendency to use the principles of multi-agency, which reflect the development of the system concept of distributed processing of matter, energy and

Адрес для переписки

Гулай Анатолий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: + 375 17 293-91-85
is@bntu.by

Address for correspondence

Gulay Anatoly V.
Belorussian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: + 375 17 293-91-85
is@bntu.by

information. To perform work and solve target functional tasks in multi-agent systems, it is assumed that parallel functioning system objects are involved, which to a certain extent are endowed with subjective rights and play the role of executive agents. By introducing components of intelligent control of the components of the designed system, the processes of their individual and group functioning are implemented. With this in mind, the article analyzes the main schemes for organizing processes for solving functional tasks and suggests indicators of the efficiency of multi-agent technologies use. In particular, a variant of solving unrelated system tasks using the same type of executive agents is considered. The possibility of using the same type of agents to solve multivariate problems with subsequent consolidated results is shown. A variant of preliminary decomposition of tasks into separate logically completed phases and further obtaining an aggregated result is also given. An approach to solving functional tasks based on a parallel-sequential conveyor implementation of their individual stages and subsequent selection of an adequate result is presented. As indicators of the effectiveness of the application of multi-agent technologies to solving system problems, characteristics based on the assessment of time and probability of obtaining correct results are proposed and analyzed. Thus, the group of indicators characterizing the solution process includes the total time for completing tasks by a group of agents, as well as the compression coefficient in the form of the ratio of the average time of a single-agent sequential solution of a set of tasks to the standard time of their multi-agent execution. The process under consideration is also characterized by the calculated probability of providing the necessary set of solutions in a given standard time and the probability of obtaining a set of correct results with multiple parallel solutions of the problem using a group of agents.

Keywords: principle of multiagency, distributed system, intelligent management, executive agent, collective behavior, task decomposition, synchronization of actions, aggregated result, compression coefficient

For citation: Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2025) Organization of Processes for Solving Functional Problems in Multi-Agent Systems. *Science and Technique*. 24 (2), 87–97. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-87-97> (in Russian)

Введение

В проектировании систем управления производственно-технического назначения в настоящее время наблюдается существенное видоизменение методологической платформы их архитектурного построения. Оно выражается в смещении организации решения требуемого набора целевых системных задач по обработке или преобразованию вещества, энергии и информации в направлении использования принципов мультиагентности [1–4]. Для выполнения работ и решения задач в мультиагентных системах предполагается широкое задействование групп параллельно функционирующих системных объектов, которые получили наименование исполнительных агентов.

Рассматриваемая концепция мультиагентности охватывает следующие аспекты формирования указанных систем [5–7]:

- теоретические основы индивидуализированного аппаратно-программного построения агентов с возможностью последующего их объединения в группы с элементами коллективного поведения;
- архитектурные аспекты создания мультиагентных систем и принципы управления процессами индивидуального и группового функционирования агентов;
- методы и средства поддержки мобильности и групповой целостности исполнительных агентов;

- процессы составления планов совместных действий агентов в группах и их синхронизации;
- приемы разрешения возможных конфликтов частных целей и действий агентов в группах;
- процедуры выполнения агентами своих задач и функциональной локализации избытка агентов с учетом требования минимизации взаимных помех;
- способы обеспечения физической и информационной безопасности групп исполнительных агентов.

Необходимо отметить также, что реальное проявление эффективности рассматриваемых мультиагентных технологий следует ожидать в том случае, если выполняемые работы или задачи имеют однородную системную направленность и принадлежат к общей проблемной области или к области взаимного пересечения, наложения определенных предметных направлений (например, информационного, математического, технического, военного, геодезического, топографического, строительного, медицинского, экологического и других). Кроме того, работам и задачам должен быть свойственен позитивный отклик на концентрацию материальных и информационных усилий группы агентов, привлекаемых к решению задач или к решению отдельных составных частей выполняемых заданий. В наиболее благоприятном случае задачи должны допускать декомпози-

цию на некоторое количество самостоятельных подзадач, которые могут рассматриваться как отдельные фазы работ для достижения общего решения на поднаборах начальных условий и попарно непересекающихся поднаборах исходных данных.

Анализ научно-технических источников показывает, что существенные результаты по созданию распределенных многоагентных технологий могут быть достигнуты в области передачи и обработки информации [6, 7]. Однако, несмотря на значительный объем теоретических и прикладных работ, выполненных на данном проблемном направлении, остается открытым вопрос общего формального описания категорий системных задач и выделения наборов признаков, при которых могут быть получены ощутимые преимущества мультиагентного распараллеливания работ в различных приложениях [8–11]. Кроме того, недостаточно проработаны методы предварительной оценки коллективного функционального потенциала групп агентов, что необходимо для спецификаций, расчетов и сопоставления показателей эффективности применения рассматриваемых технологий. С учетом этого в статье проанализированы основные схемы организации процессов решения функциональных задач и предложены показатели эффективности применения мультиагентных технологий.

Концепция применения мультиагентных технологий в решении системных задач

В качестве показателей эффективности применения мультиагентных технологий к выполнению набора работ или к решению системных задач $\{Z_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, M$ – номер задачи) при распараллеливании процессов их решения между Q агентами выбираются следующие характеристики:

- общее требуемое или нормативно заданное время $T(Z, X, M, Q)$ обеспечения параллельного выполнения M работ или решения M задач из общего набора Z при использовании начальных условий и исходных данных X группой из Q агентов;
- расчетная вероятность $P_{ZMQ}(Q)$ обеспечения необходимого множества решений R_{ZMQ} , адекватных начальным условиям и исходным

данным для набора работ или задач, за заданное нормативное время $T(Z, X, M, Q)$;

- коэффициент компрессии $K(Z, X, M, Q)$ в виде отношения среднего значения времени одноагентного последовательного решения набора задач $T(Z, X, M, Q = 1)$ к нормативному времени $T(Z, X, M, Q)$ их многоагентного решения с учетом времени выполнения процедур управления агентами и закрепления за ними конкретных работ или задач;

- вероятность $P(Z_i, m, Q)$ получения не менее m корректных решений определенной задачи Z_i при ее Q -кратном параллельном решении с использованием Q агентов.

Возможно выделение следующих категорий задач (А–Д), принципиально допускающих эффективное применение мультиагентных технологий [4].

А. Набор самостоятельных задач $\{Z_i\}$ с номерами i , которые реализуют несвязанные индивидуальные методы и алгоритмы выработки решений $\{F_i\}$ и, следовательно, в принципе допускают последующее их параллельное решение на наборах индивидуальных начальных условий и исходных данных $\{X_i\}$ с нахождением множества результатов

$$R_{ZMQ} = \{R_i(Z_i, X_i)\}.$$

В. Самостоятельная многовариантная задача Z_j (с номером j), имеющая некоторый алгоритм решения F_j и требующая параллельного нахождения результатов решений для различных вариантов X_w начальных условий и исходных данных $X = \{X_w\}$, $w = 1, 2, \dots, W$ – номер варианта. Последующее формальное объединение этих результатов приводит к получению консолидированного решения

$$R_{ZwQ} = \{R_w(Z, X_w)\}.$$

С. Самостоятельная многофазовая задача Z_j (с номером j), допускающая декомпозицию на N самостоятельных подзадач $Z_j = \{z_{jk}\}$, которые рассматриваются как отдельные фазы работ для достижения общего решения R_{ZNQ} , последующее параллельное решение подзадач на поднаборах начальных условий и попарно непересекающихся поднаборах исходных данных $X_N = \{X_k\}$; $X_k \cap X_{kq} = \emptyset$; $k, q = 1, 2, \dots, N$ с объ-

единением результатов в общее агрегированное решение

$$R_{Z_{NQ}} = \bigcup_{j=1}^N \alpha_j R_j(z_j, x_j),$$

где α_j – коэффициенты композиции.

Разбиение системной задачи на отдельные, разрозненные фазы называют процессом «сгибания».

Среди задач категории **C** выделяется крайне важный в прагматическом отношении вариант, когда формируемые результаты выполнения очередной фазы являются исходными для выполнения последующей фазы и требования $X_k \cap X_q = \emptyset$ либо вообще не выполняются, либо выполняются только для отдельных сочетаний начальных условий и исходных данных k, q . В этом случае «сгибание» в общем плане невозможно, однако при поточном характере поступления в систему требований на решение задачи Z может быть организован последовательно-параллельный режим конвейерного функционирования Q агентов по обработке потоков требований и достигнут определенный позитивный эффект.

D. Отдельная работа, задача Z_j или ее подзадача z_{jk} , для выполнения которой требуется организация параллельного Q -кратного решения с целью получения не менее m корректных результатов, их последующего сопоставления и отбора для повышения результирующей вероятности выработки адекватного решения $P_{Z \text{ рез}}$ или $P_{z_k \text{ рез}}$.

Здесь и далее при описании задач **B, C, D** используется обозначение номера задачи j с тем, чтобы особо подчеркнуть, что многовариантная, многофазовая задача Z_j (с номером j) может быть элементом множества задач $\{Z_i\}$.

Для предварительной оценки показателей эффективности применения мультиагентных технологий к решению набора системных задач $\{Z_i\}$ объективно требуется проведение предварительных эмпирических и экспертных исследований процессов выполнения работ или решения задач в одноагентном режиме. Целью таких исследований является построение интервалов распределения $\{T_{i \min}; T_{i \max}\}$ значений длительности выполнения работ или решения задач, адекватных начальным условиям и ис-

ходным данным, а также сглаживающих распределений этих значений в виде функций плотности распределения вероятности $\{f_i(t)\}$.

Как правило, в технологию построения системы вводится процедура обязательного предварительного контроля корректности исходных условий и данных для исполнения того или иного процесса, а также контроля общего времени реализации отдельных процессов. Этот контроль осуществляется с помощью средств оценки корректности и непротиворечивости сведений на входах процессов и средств предотвращения заикливания. Эксперименты по выполнению реальных работ или по «прогону» реальных задач (а также их моделей) позволяют оценить границы интервалов распределений $\{T_{i \min}; T_{i \max}\}$. Под процедурой «прогона» здесь понимается процесс однократного решения конкретной системной задачи от начала до конца.

В ряде случаев параметры $T_{i \min}$ могут соответствовать моментам времени «отсечки» процессов решения задач при выявлении некорректностей исходных условий и данных, а параметры $T_{i \max}$ – моментам времени «отсечки» процессов при выявлении фактов наиболее вероятного заикливания. «Отсечкой» в подобных случаях называется принудительное снятие процесса решения системной задачи с исполнения при угрозе заикливания. Введение процедуры «отсечки» приводит к тому, что в качестве распределения времени корректного решения задач при проведении системного анализа необходимо применять распределения $\{f_i^*(t)\}$, усеченные на интервалах $\{T_{i \min}; T_{i \max}\}$. Они формируются с помощью процедур интервального усечения, предварительно подобранных экспертами сглаживающих распределений $\{f_i(t)\}$.

Если в результате экспериментов получены данные, которые позволяют по правилам их статистической обработки апостериорно вычислить средние значения и дисперсии $\{M_{ti}^*, D_{ti}^*\}$ усеченных распределений времени решения отдельных задач, то методом выравнивания первого осевого и второго центрального моментов могут быть подобраны средние значения и дисперсии $\{M_{ti}, D_{ti}\}$ для сглаживающих и

в дальнейшем отсекаемых распределений $\{f_i(t)\}$. Усеченные распределения связаны с апостериорными отсекаемыми распределениями соотношениями, известными из теории вероятностей [12]:

$$f_i^*(t) = 0, \text{ если } t \leq T_{i \min} \text{ или } t \geq T_{i \max};$$

$$f_i^*(t) = A f_i(t), \text{ если } T_{i \min} \leq t \leq T_{i \max};$$

$$A = [F_i(T_{i \max}) - F_i(T_{i \min})]^{-1}; \quad F_i(t) = \int_{-\infty}^t df_i(t).$$

В качестве начальных значений в процедуре подбора параметров отсекаемых распределений целесообразно применять значения $M_{i \text{ин}} = A M_{i \text{и}}^*$, $D_{i \text{ин}} = A D_{i \text{и}}^*$, которые подлежат итерационному уточнению.

Решение несвязанных задач с использованием системы однотипных агентов

Рассмотрим параметры процесса многоагентного выполнения работ или решения задач категории **A** при условии высокой функциональной надежности однотипных или специализированных агентов и при $Q \geq M$. Корректность приводимых рассуждений сохраняется также в том случае, если $Q < M$, но при этом для динамического перераспределения агентов по работам или задачам рассматривается применение исключительно однотипных агентов, а также дополнительно выполняется разбиение общего множества задач Z на несколько последовательно обрабатываемых подмножеств

с последующим формированием результатов итогового расчета.

Применение многоагентной технологии потенциально позволяет обеспечить достижение эффекта ускорения общего процесса решения набора задач категории **A**, который выполняется по следующей схеме (рис. 1):

- ⟨ Несвязанный набор задач + Несвязанный набор исходных данных →
- Множество функционально однотипных или специализированных агентов →
- Множество результатов параллельного решения задач исходного набора ⟩.

Для обеспечения заданного нормативного времени $T(Z, X, M, Q)$ выполнения работ или решения M задач из их полного набора Z при использовании группы из Q параллельно функционирующих агентов должно выполняться следующее основополагающее соотношение баланса времени по каждому из агентов:

$$T_i \leq T(Z, X, M, Q),$$

где T_i – время выполнения работы соответствующим агентом или решения им задачи $z_i \in Z$ с получением результата, адекватного начальным условиям и исходным данным.

Если $P_i[T_i \leq T(Z, X, M, Q)]$ – вероятности обеспечения в системе индивидуальных значений времени решения отдельных задач, не превышающих установленного нормативного значения, то для всего набора из M задач расчетная вероятность $P_{ZMQ}(Q)$ составит

$$P_{ZMQ}(Q \geq M) = \prod_{i=1}^M P_i[T_i \leq T(Z, X, M, Q)].$$



Рис. 1. Схема решения набора несвязанных задач с использованием системы однотипных агентов

Fig. 1. Scheme for solving a set of unrelated problems using a system of similar agents

Следует отметить, что из анализа результатов предварительных эмпирических и экспертных исследований процессов решения задач в одноагентном режиме следует соотношение

$$P_{ZMQ}(Q \geq M) = \prod_{i=1}^M \{F_i^*[T_i = T(Z, X, M, Q)] - F_i^*[T_i = T_{i \min}]\},$$

$$F_i^*(t) = \int_{-\infty}^t df_i^*(t).$$

При проведении практического системного анализа рациональной технологической процедурой является замена аналитического интегрирования на численное интегрирование по методу трапеций или по иному методу, позволяющему найти и оценить расчетные вероятности $P_{ZMQ}(Q \geq M)$ обеспечения необходимого множества решений

$$R_{ZM} = \{R_i(Z_i, X_i)\},$$

за нормативный интервал времени $T(Z, X, M, Q)$

$$P_{ZMQ}(Q \geq M) \geq \prod_{i=1}^M \Delta t \cdot [f_{i1}^*(T_{i \min}) / 2 + \sum_{n=2}^{J-1} f_{in}^*(T_{i \min} + n \cdot \Delta t) + f_{iJ}^*(T_{i \min} + J \cdot \Delta t) / 2],$$

где $\Delta t = (T_{i \max} - T_{i \min}) / L$ – интервал времени численного интегрирования; $L = 10-12$ – количество интервалов численного интегрирования; $J = \text{Ant}_{(-)}\{[T(Z, X, M, Q) - T_{i \min}] / \Delta t\}$ – функция Антье для нижней целочисленной границы аргумента.

Оценка коэффициента компрессии $K(Z, X, M, Q \geq M)$ выполняется на основе расчета среднего значения времени $T(Z, X, M, Q = 1)$ одноагентного последовательного решения рассматриваемого набора задач. С этой целью с использованием метода численного интегрирования определяется значение указанного параметра

$$T(Z, X, M, Q = 1) = \sum_{i=1}^M \int_{T_{i \min}}^{T_{i \max}} t \cdot f_i^*(t) dt \approx \sum_{i=1}^M \Delta t \{f_{i1}^*(T_{i \min})[T_{i \min} / 2] + \sum_{n=2}^{J-1} f_{in}^*(T_{i \min} + n \Delta t)[T_{i \min} + n \Delta t] +$$

$$+ f_{iJ}^*(T_{i \min} + J \cdot \Delta t) \cdot [T_{i \min} + J \cdot \Delta t] / 2\}.$$

Коэффициент компрессии $K(Z, X, M, Q \geq M)$ оценивается с использованием следующего выражения:

$$K(Z, X, M, Q \geq M) = + T(Z, X, M, Q = 1) \cdot [T(Z, X, M, Q) + t_{\text{упр}}]^{-1},$$

где $t_{\text{упр}}$ – ожидаемые усредненные затраты времени на выполнение процедур управления агентами в расчете на одну задачу. В идеальном случае при $Q \geq M$ и $t_{\text{упр}} \rightarrow 0$ желательное достижение этим коэффициентом значения, близкого к количеству задач в наборе: $K(Z, X, M, Q \geq M) \rightarrow M$.

Если $Q < M$, то при заданном нормативном значении $T(Z, X, M, Q)$ в качестве верхней границы $T(Z, X, M, Q < M)$ допустимого времени решения задач используется следующее выражение:

$$T(Z, X, M, Q < M) = G^{-1} \cdot T(Z, X, M, Q),$$

где $G = \text{Ant}_{(+)}\{M / Q\}$ – функция Антье для верхней целочисленной границы количества подмножеств задач, внутри которых отдельные задачи могут параллельно обрабатываться агентами. Эти подмножества задач имеют индивидуальные мощности не выше Q и входят в полное множество задач с мощностью M .

Анализируемая система может состоять из однотипных агентов в смысле их способности решения любых задач рассматриваемого набора. Основопологающее соотношение баланса времени в этом случае принимает вид

$$T_i \leq T(Z, X, M, Q < M),$$

где T_i – время получения адекватного решения задачи $z_i \in Z$ соответствующим агентом. При этом

$$P_{ZMQ}(Q < M) \geq \prod_{k=1}^G \prod_{i_k=1}^{Q < M} \Delta t \cdot \{f_{i_k}^*(T_{i_k \min}) / 2 + \sum_{n=1}^{J-1} f_{i_k n}^*(T_{i_k \min} + n \Delta t) + f_{i_k J}^*\{(T_{i_k \min} + J \Delta t) / 2\}\},$$

$$K(Z, X, M, Q < M) = = T(Z, X, M, Q = 1) \cdot G \cdot [T(Z, X, M, Q) + t_{\text{упр}}]^{-1}.$$

Для исключения возможных негативных влияний на функциональные процессы избыточных и образующихся в процессе решения задач незадействованных («свободных») агентов их целесообразно своевременно выводить из рабочей зоны или принудительно блокировать до момента возникновения потребности в использовании. Это положение целесообразно соблюдать при решении задач всех категорий.

Применение однотипных агентов в решении задачи с консолидацией результатов

Рассмотрим параметры процесса многоагентного решения задач категории **В** при тех же условиях, что и в случае категории **А**, но только для набора однотипных агентов в смысле возможности решения любых вариантов рассматриваемой задачи. Некоторая задача z_j может требовать нахождения результатов решений для различных вариантов X_w начальных условий и исходных данных $X = \{X_w\}$. Эффект ускорения общего процесса решения вариантов задачи достигается при организации выполнения работ по следующей схеме (рис. 2):

- ⟨ Конкретная функциональная задача + Набор вариантов исходных данных →
- Множество функционально однотипных агентов →
- Множество вариантов решений → Консолидация вариантов решений ⟩ .

Эта категория задач является частным случаем задач категории **А**, но имеет особенно-

сти системного анализа и проведения расчетов.

Рассмотрим условия обеспечения заданного нормативного времени $T(z_j, X, W, Q)$ решения задачи z_j для набора вариантов W начальных условий и исходных данных при использовании группы агентов высокой функциональной надежности и однотипности $Q \geq W$. По каждому из вариантов должно выполняться следующее основополагающее соотношение баланса времени:

$$T_w \leq T(z_j, X, W, Q).$$

Если $P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)]$ – вероятность обеспечения в системе длительности решения отдельных вариантов задачи z_j , не превышающей нормативное значение, то для оценки вероятности $P_{ZW}(z_j, Q \geq W)$ обеспечения нормативного времени решения по всему набору вариантов W могут применяться соотношения, получаемые на основе численного интегрирования. Эти соотношения имеют следующий вид:

$$P_{ZW}(z_j, Q \geq W) = \prod_{w=1}^W P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)] = \prod_{j=1}^W \Delta t \{ f_{j1}^*(T_{j \min}) / 2 + \sum_{n=2}^J f_{jn}^*(T_{j \min} + n\Delta t) + f_{jJ}^*(T_{j \min} + J\Delta t) / 2 \},$$

где $J = \text{Ant}_{(-)}\{[T(z_j, X, M, Q) - T_{j \min}] / \Delta t\}$ – функция Антье для нижней целочисленной границы аргумента.



Рис. 2. Схема применения однотипных агентов в решении отдельной задачи с консолидацией результата

Fig. 2. Scheme for using agents of the same type in solving a separate problem with consolidation of the result

При однородности внутреннего содержания вариантов решений рассматриваемой задачи можно ожидать, что вероятности $P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)]$ будут достаточно близкими для отдельных вариантов и могут быть представлены их общей нижней границей:

$$\begin{aligned} \text{Inf } P[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)] &= \\ &= \min\{P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)]\}. \end{aligned}$$

В силу этого

$$P_{ZW}(z_j, Q \geq W) \geq \{\text{Inf } P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)]\}^W.$$

В последующем выполняется формальное объединение результатов и получение с вероятностью $P_{ZW}(z_j, Q \geq X)$ консолидированного решения за установленный интервал времени $T(z_j, X, W, Q)$:

$$R_{ZWQ} = \bigcup_{w=1}^W R_w(z_j, X_w).$$

При $Q < W$ основополагающее соотношение баланса времени принимает следующий вид:

$$T_j \leq T(z_j, X, W, Q < W) = G^{-1} \cdot T(z_j, X, W, Q),$$

где T_j – время получения адекватного решения задачи $z_j \in Z$ соответствующим агентом; $G = \text{Ant}_{(+)}\{W / Q\}$ – функция Антье для верхней целочисленной границы аргумента.

При этом

$$\begin{aligned} P_{ZW}(Q < W) &\geq [\Delta t \{f_{j k 1}(T_{j k \min}) / 2 + \\ &+ \sum_{n=2}^{J-1} f_{j k n}(T_{j \min} + n\Delta t) + f_{j k J}(T_{j \min} + J\Delta t) / 2\}]^{GQ}; \end{aligned}$$

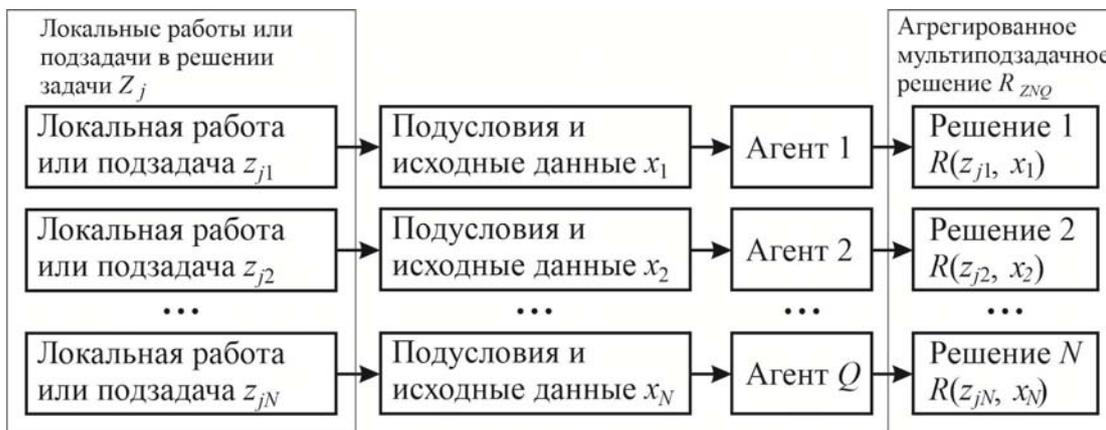


Рис. 3. Схема агрегирования результата мультиагентного решения при декомпозиции задачи на отдельные фазы
 Fig. 3. Scheme for aggregating the result of a multi-agent solution when decomposing a problem into separate phases

$$K(Z, X, W, Q < M) =$$

$$= T(z_j, X, W, Q = 1) \cdot G \cdot [T(z_j, X, W, Q \leq MD) + t_{\text{упр}}]^{-1}.$$

Консолидация результата решения при декомпозиции задачи на отдельные фазы

Процесс многоагентного решения задач категории С предполагает декомпозицию каждой задачи Z_j на самостоятельные подзадачи $Z_j = \{z_{jk}\}$, а также последующее параллельное решение подзадач на поднаборах начальных условий и исходных данных $X_j = \{x_{jk}\}$ по следующей схеме (рис. 3):

⟨ Конкретная функциональная задача →
 → Набор самостоятельных подзадач (фаз) +
 + Множество поднаборов начальных условий и исходных данных →
 → Множество функционально однотипных или специализированных агентов →
 → Множество решений подзадач → Агрегированное решение ⟩.

Решение рассматриваемой категории задач для случая $Q < N_j$ значимого технического смысла не имеет (здесь N_j – количество фаз в расщеплении задачи Z_j , которое устанавливается системным аналитиком). В случае $Q \geq N_j$ результирующее решение представляется в композиционной форме с коэффициентами композиции α_j :

$$R_{ZWQ} = \bigcup_{j=1}^N \alpha_j \cdot R_j(z_j, x_j).$$

Решение должно быть сформировано за установленное нормативное время $T(z_j, x_j, N_j, Q)$ с вероятностью

$$P_{ZN}(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) = \prod_{k=1}^{N_j} P_j[T_j \leq T(z_{jk}, x_{jk}, N_j, Q \geq N_j)]$$

и коэффициентом компрессии

$$K(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) = T(z_j, x_j, N_j, Q = 1) \times [T(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) + t_{\text{упр}}]^{-1}.$$

В представленных выражениях $T(z_{jk}, x_{jk}, N_j, Q)$ – нормативное время выполнения k -й фазы. Нормативное время решения задачи Z_j определяется в данном случае следующим образом:

$$T(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) = \max\{T(z_{jk}, x_{jk}, N_j, Q \geq N_j), k = 1, 2, \dots, N_j,$$

$$T(z_j, x_j, N_j, Q = 1) = \sum_{k=1}^{N_j} T(z_{jk}, x_{jk}, N_j, Q \geq N_j).$$

Вероятностные соотношения определяются следующими процедурами численного интегрирования:

$$P_j[T_j \leq T(z_j, x_j, N, Q \geq N)] = \prod_{k=1}^{N_j} \sum_{n=1}^{L_{jk}} \Delta t \cdot [f_{jk1}^*(T_{j \min} + \sum_{q=1}^{k-1} \Delta t \cdot L_{jq}) / 2 + \sum_{n=1}^{L_{jk}-1} f_{jk n}^*(T_{j \min} + \sum_{q=1}^{k-1} \Delta t L_{jq} + L_{jk} \Delta t) + f_{jk n}^*(T_{j \min} + \sum_{q=1}^{k-1} \Delta t L_{jq} + L_{jk} \Delta t) / 2],$$

где $\Delta t = (T_{j \max} - T_{j \min}) / \left(\sum_{k=1}^{N_j} L_{jk} \right)$ – интервал

времени численного интегрирования фаз задачи Z_j ; $L_{jk} = 10-12$ – количество интервалов численного интегрирования фазы z_j .

Для задач этой категории главным проблемным аспектом возможного применения мультиагентных технологий является расщепление задачи с произвольной структурой на отдель-

ные параллельные фазы. В научно-технической литературе опубликованы различные математические методы расщепления сетевых графов выполнения работ на блоки реализации параллельных фаз с минимальным количеством параметров взаимодействия. Кроме того, известны методы и приемы разбиения сетевых графов на параллельные блоки с близкими объемами выполняемых неделимых операций. Системный анализ возможностей практического использования этих методов показывает, что их эффективность существенно зависит от особенностей каждой задачи. При этом далеко не все задачи дают удовлетворительные результаты по расщеплению алгоритмов на фазы, которые допускают последующее масштабирование и агрегирование.

Конвейерное параллельно-последовательное выполнение фаз решения задачи

Более простым и в то же время более продуктивным вариантом является конвейерная обработка потока требований на решение задачи Z_j (вариант **D**). В данном случае длительность процедуры каждого решения задачи в многоагентном варианте соответствует времени ее решения при одноагентном представлении

$$T(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) = T(z_j, x_j, N_j, Q = 1),$$

при этом общий эффект с указанным выше коэффициентом компрессии $K(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j)$ достигается только после «разгона» конвейерной системы в течение времени $T(z_j, x_j, N_j, Q = 1)$. В понятие «разгона» конвейерной системы вкладывается смысл последовательного подключения к параллельной работе всех ее агентов.

На рис. 4 представлена схема реализации обработки потока требований на решение задачи Z_j . Показано чередование фаз $\Phi_1-\Phi_4$ конвейерной параллельно-последовательной обработки потока требований для $Q = 4$. Внутри каждого требования происходит последовательное выполнение фаз решения задачи. Завершение любой фазы решения задачи сопровождается началом выполнения этой же фазы для следующей очередной задачи.

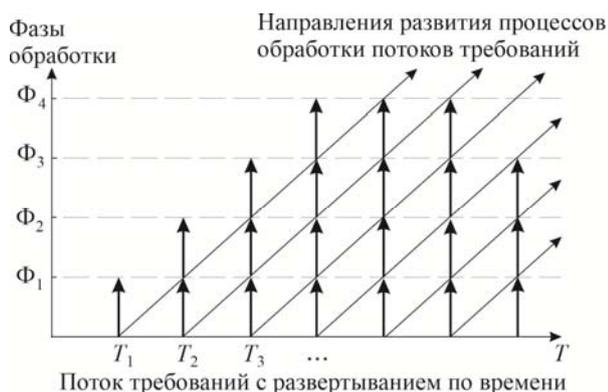


Рис. 4. Схема чередования фаз конвейерной параллельно-последовательной обработки потока требований

Fig. 4. Diagram of conveyor phase sequence for parallel-sequential processing of a stream requirements

Задачи категории **D** предусматривают параллельное Q -кратное решение задачи Z_j или ее подзадач z_{jk} с целью получения не менее m адекватных решений и повышения результирующей вероятности $P_{Z \text{ рез}}$ (или $P_{z_k \text{ рез}}$) выработки решений за установленный интервал времени T_Z (или T_{z_k}):

$$P_{Z \text{ рез}} = \sum_{j=0}^{Q-m} C_Q^j \cdot [P_Z]^{Q-j} [1 - P_Z]^j;$$

$$P_{z_k \text{ рез}} = \sum_{j=0}^{Q-m} C_Q^j \cdot [P_{z_k}]^{Q-j} [1 - P_{z_k}]^j,$$

где P_Z , P_{z_k} – вероятности выработки адекватных результатов в случае однократного решения; C – количество сочетаний. При этом наблюдается эффект повышения вероятности успешной реализации процесса решения конкретной функциональной задачи или подзадачи за счет Q -кратного физического распараллеливания этого процесса и повторения решений.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы основные схемы организации процессов решения функциональных задач и предложены показатели эффективности применения мультиагентных технологий. В частности, рассмотрен вариант решения несвязанных системных задач с использованием

однотипных исполнительных агентов. Показана возможность применения однотипных агентов для решения многовариантных задач с последующим получением консолидированных результатов. Приведен вариант предварительной декомпозиции задач на отдельные логически завершенные фазы и дальнейшего получения агрегированного результата. Представлен подход к решению функциональных задач на основе конвейерной параллельно-последовательной реализации их отдельных стадий и последующего отбора адекватного результата.

2. Представлен подход к решению функциональных задач на основе конвейерной параллельно-последовательной реализации их отдельных стадий и последующего отбора адекватного результата. В качестве показателей эффективности применения мультиагентных технологий к решению системных задач предложены и проанализированы характеристики, основанные на оценке времени и вероятности получения корректных результатов. Так, группа показателей, характеризующих процесс решения, включает общее время выполнения задач группой агентов и коэффициент компрессии в виде отношения среднего значения времени одноагентного последовательного решения набора задач к нормативному времени их мультиагентного исполнения. Рассматриваемый процесс характеризуется также расчетной вероятностью обеспечения необходимого множества решений за заданное нормативное время и вероятностью получения множества корректных результатов при многократном параллельном решении задачи с использованием группы агентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбина, Г. В. Современные архитектуры динамических интеллектуальных систем: проблемы интеллектуализации и основные тенденции / Г. В. Рыбина // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 1–12.
2. Карпов, В. Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике / В. Э. Карпов // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2016. Вып. 59. С. 165–232.
3. Гулай, А. В. Построение интеллектуальных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев. Минск: ИВЦ Минфина, 2022. 368 с.

4. Гулай, А. В. Сетевое информационное взаимодействие агентов роя: техническая и программная реализация / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25, № 6. С. 295–305. <https://doi.org/10.17587/mau.25.295-305>.
5. Городецкий, В. И. Многоагентные системы (обзор) / В. И. Городецкий, М. С. Грушинский, А. В. Хабалов. URL: <https://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor/>.
6. Зайцев, В. М. Организация распределенной обработки данных на вычислительных комплексах АСУ / В. М. Зайцев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая. 1982. Вып. 10. С. 26–32.
7. Тарасов, В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям / В. Б. Тарасов. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
8. Giorgini, P. Agent-Oriented Software Engineering IV: 4th International Workshop, AOSE 2003, Melbourne, Australia, July 15, 2003 / P. Giorgini, J. P. Müller, J. Odell. Berlin, Heidelberg: Springer, 2023. 247 p. <https://doi.org/10.1007/b95187>.
9. Towards Reliable Multi-Agent System: An Adaptive Replication Mechanism / Z. Guessoum, J.-P. Briot, N. Faci, O. Martin // Multiagent and Grid Systems. 2010. Vol. 6, No 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.3233/mgs-2010-0139>.
10. Hübner, J. F. A Normative Programming Language for Multi-Agent Organizations / J. F. Hübner, O. Boissier, R. H. Bordini // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2011. Vol. 62, No 1. P. 27–53. <https://doi.org/10.1007/s10472-011-9251-0>.
11. Dimensions in Programming Multi-Agent Systems / O. Boissier, R. H. Bordini, J. F. Hübner, A. Ricci // Knowledge Engineering Review. 2019. Vol. 34, No 2. P. 1–28. <https://doi.org/10.1017/s026988891800005x>.
12. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: КноРус, 2010. 664 с.
2. Karpov V. E. (2016) Models of Social Behavior in Group Robotics. *Upravlenie Bolshimi Sistemami* [Management of Large Systems]. Moscow, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Is. 59, 165–232 (in Russian).
3. Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2022) *Building Intelligent Systems*. Minsk: Information and Computing Center of Ministry of Finance of the Republic of Belarus. 368 (in Russian).
4. Gulay A. V. Zaitsev V. M. (2024) Network Information Interaction of Swarm Agents: Technical and Software Implementation. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 25 (6), 295–305. <https://doi.org/10.17587/mau.25.295-305> (in Russian).
5. Gorodetsky V. I., Grushinsky M. S., Khabalov A. V. (1998) Multi-Agent Systems (Review). Available at: <https://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor/> (in Russian).
6. Zaitsev V. M. (1982) Organization of Distributed Data Processing on Automated Control System Computing Complexes. *Voprosy Radioelektroniki. Ser. Obshchetekhnicheskaya = Questions of Radio Electronics. General Technical Series*, (10), 26–32 (in Russian).
7. Tarasov V. B. (2002) From Multi-Agent Systems to Intellectual Organizations. Moscow, Publishing House of Editorial URSS. 352 (in Russian).
8. Giorgini, P. Müller J. P., Odell J. (2003) Agent-Oriented Software Engineering IV. 4th International Workshop, AOSE 2003, Melbourne, Australia, July 15, 2003. Berlin, Heidelberg, Springer, 2023. 247. <https://doi.org/10.1007/b95187>.
9. Guessoum Z., Briot J.-P., Faci N., Marin O. (2010) Towards Reliable Multi-Agent System: An Adaptive Replication Mechanism. *Multiagent and Grid Systems*. 2010, 6 (1), 1–24. <https://doi.org/10.3233/mgs-2010-0139>.
10. Hübner J. F., Boissier O., Bordini R. H. (2011) A Normative Programming Language for Multi-Agent Organizations. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 62 (1), 27–53. <https://doi.org/10.1007/s10472-011-9251-0>.
11. Boissier O., Bordini R. H., Hübner J. F., Ricci A. (2019) Dimensions in Programming Multi-Agent Systems. *Knowledge Engineering Review*, 34 (2), 1–28. <https://doi.org/10.1017/s026988891800005x>.
12. Wentzel E. S. (2010) *Probability Theory*. Moscow, KnoRus Publ. 664 (in Russian).

Поступила 04.11.2024

Подписана в печать 21.01.2025

Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Rybina G. V. (2017) Modern Architectures of Dynamic Intelligent Systems: Problems of Intellectualization and Main Trends. *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol, Diagnostika Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, (2), 1–12 (in Russian).

Received: 04.11.2024

Accepted: 21.01.2025

Published online: 31.03.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-98-108>

УДК 621.891;621.894

Влияние магнитного поля на структуру полимерных медьсодержащих композитов для узлов стационарного трения

Докт. физ.-мат. наук, проф. А. Г. Анисович¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. Н. Бухаров²⁾,
В. К. Меринов²⁾, канд. техн. наук, доц. В. П. Сергиенко²⁾

¹⁾Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем
имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси» (Гомель, Республика Беларусь)

Реферат. Исследовано влияние предварительной обработки импульсным магнитным полем на композиционную смесь порошков (политетрафторэтилен, порошок медный стабилизированный, базальтовое волокно, дисперсная неорганическая фрикционная добавка) для получения прессованных полимерных фрикционных материалов. Для обработки использовался экспериментальный прибор ИМИ-И. Варьировались напряженность магнитного поля, количество импульсов и их полярность. Методом оптической микроскопии исследовано изменение структуры поверхности композиционного материала после прессования, разрезки, а также поверхности после испытаний на трение. Установлено существенное влияние магнитного поля на структуру образцов. Повышается однородность свободной поверхности, снижается пористость, существенно изменяется морфология и повышается возможность визуализации фаз. Отмечено изменение поверхности среза, сформированной инструментом при разрезке кольцевой заготовки на отдельные образцы. Обработка в магнитном поле приводит к формированию менее развитого рельефа поверхности; эффект интенсифицируется при увеличении количества импульсов от двух до четырех, а также при увеличении напряженности поля. Значительно изменяется морфология поверхности трения: обработка способствует снижению различий между периферийной областью и центром образца. Пленки переноса формируются существенно менее интенсивно. Полимерная фаза не демонстрирует наличия вязких участков. Рентгеноструктурным анализом исследован фазовый состав и изменение статических смещений атомов из положений равновесия. Установлено, что фазовый состав материала под влиянием магнитной обработки не изменяется. Показано, что предварительная обработка композиционной смеси магнитным полем влияет на статические смещения атомов из положений равновесия в медной фазе. Обработка в магнитном поле способствует формированию равновесной структуры меди за счет совершенствования кристаллической решетки. Установлено, что эффект воздействия в наибольшей степени зависит от количества импульсов и их полярности. Наиболее эффективным является применение однополярного импульса.

Для цитирования: Влияние магнитного поля на структуру полимерных медьсодержащих композитов для узлов стационарного трения / А. Г. Анисович [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 98–108. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-98-108>

Ключевые слова: фрикционные композиционные материалы, медь, морфология поверхности, микроструктура, магнитное поле, статические смещения атомов

Адрес для переписки

Анисович Анна Геннадиевна
Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси»
ул. Академическая, 16,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 664-65-56
anna-anisovich@yandex.ru

Address for correspondence

Anisovich Anna G.
State Scientific Institution
“Institute of Applied Physics of the
National Academy of Sciences of Belarus”
16, Academic str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 664-65-56
anna-anisovich@yandex.ru

Effect of Magnetic Field on Structure of Copper-Containing Polymer Composites for Stationary Friction Units

A. G. Anisovich¹⁾, S. N. Bukharov²⁾, V. K. Merinov²⁾, V. P. Sergienko²⁾

¹⁾State Scientific Institution “Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾State Scientific Institution “Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems named after V. A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus” (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The effect of preliminary treatment with a pulsed magnetic field on a composite mixture of powders (polytetrafluoroethylene, stabilized copper powder, basalt fiber, dispersed inorganic friction additive) for obtaining pressed polymer friction materials is investigated. An experimental device IMI-I was used for processing. The magnetic field strength, number of pulses and their polarity were varied. The change in the surface structure of a composite material after pressing, cutting, as well as the surface after friction tests was studied using the method of optical microscopy. A significant effect of the magnetic field on the structure of the samples was found. The homogeneity of the free surface increases, porosity decreases, the morphology changes significantly and the ability of phase visualization increases. A change in the cut surface formed by the tool when cutting a ring blank into individual samples is noted. Treatment in a magnetic field leads to the formation of a less developed surface relief; the effect is intensified with an increase in the number of pulses from two to four, as well as with an increase in the field strength. The morphology of the friction surface changes significantly: the treatment helps to reduce the differences between the peripheral region and the center of the sample. Transfer films are formed much less intensively. The polymer phase does not demonstrate the presence of viscous areas. The phase composition and change in static displacements of atoms from equilibrium positions were studied by X-ray structural analysis. It was found that the phase composition of the material does not change under the influence of magnetic treatment. It is shown that preliminary treatment of the composite mixture with a magnetic field affects the static displacements of atoms from equilibrium positions in the copper phase. Treatment in a magnetic field helps to form an equilibrium structure of copper due to improvement of the crystal lattice. It was found that the effect of exposure depends to the greatest extent on the number of pulses and their polarity. The use of a unipolar pulse is the most effective.

Keywords: friction composite materials, copper, surface morphology, microstructure, magnetic field, static displacements of atoms

For citation: Anisovich A. G., Bukharov S. N., Merinov V. K., Sergienko V. P. (2025) T Effect of Magnetic Field on Structure of Copper-Containing Polymer Composites for Stationary Friction Units. *Science and Technique*. 24 (2), 98–108. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-98-108> (in Russian)

Введение

В настоящее время для модифицирования структуры материалов (диэлектриков, металлов, полимеров) с целью оптимизации свойств и улучшения эксплуатационных показателей активно применяются воздействия переменным и постоянным магнитным полем [1–4]. Имеется достаточно много публикаций по исследованию влияния магнитных полей на свойства углеводов [5] и полимеров [6]. В частности, показано, что воздействие постоянным магнитным полем на полимерную композицию «эпоксидная смола ЭДП – полиэтиленполиамин дибutilфталат с железным порошком» сопровождается ростом коэффициента теплопроводности и микротвердости. Эффект связывают с упорядоченной перестройкой структуры полимера. В [7] приведе-

ны результаты исследования влияния внешнего магнитного поля на физико-механические свойства и структуру наполненных полимерных покрытий. Механическая и адгезионная прочность композиционных покрытий, полученных на основе эпоксидного олигомера, резко изменяется при обработке в магнитном поле в зависимости от вида наполнителя и напряженности внешнего магнитного поля. Установлено значительное улучшение эффективной теплопроводности и коэффициента линейного теплового расширения в процессе кристаллизации во вращающемся неоднородном магнитном поле [8]. Исследовано влияние постоянно-го магнитного поля на структуру и теплоемкость композитов на основе ацетобутирата целлюлозы и сегментированного полиуретана [9]. Показано, что воздействие ПМП напряженностью 2×10^5 А/м позволяет ослабить про-

цессы микрофазного разделения компонентов и, таким образом, достичь нового уровня модификации структуры и теплоемкости композитов. Применение магнитного поля эффективно для улучшения эксплуатационных характеристик металлических покрытий [10]. Ранее авторами было установлено, что импульсное магнитное поле (при воздействии на пресованные образцы) существенно улучшает вибродемпфирующие и акустические характеристики наполненных фторполимерных композитов [11, 12]. Магнитное поле в качестве предварительной обработки композиционной смеси (медный порошок, политетрафторэтилен, базальтовое волокно) перед операцией компактирования оказало существенное влияние на механические динамические характеристики [13]. Изменение свойств фторполимерных композитов может быть связано с изменением структуры и свойств каждого из компонентов фрикционной смеси.

Цель работы – исследование влияния магнитной обработки исходных смесей полимерных композитов на структуру пресованных фрикционных материалов.

Материалы и методики эксперимента

В качестве объектов исследования выбраны полимерные фрикционные композиты марки BMZD (ТУ ВУ 400084698.322–2022), используемые в узлах стационарного трения технологического оборудования. Композиты изготавливались на основе политетрафторэтилена (ГОСТ 10007–80). В качестве наполнителей использовали порошок медный стабилизированный марки ПМС-1 (ГОСТ 4960–2017), измельченное базальтовое волокно диамет-

ром 3 мкм (СТБ 1908–2008), поверхностно модифицированное 1,3-фенилен-бисмалеинимидом марки GP-204, и дисперсную неорганическую фрикционную добавку.

Исходная композиционная смесь обрабатывалась в импульсном магнитном поле на приборе ИМИ-И [14] одно- и двухполярными импульсами в количестве 2 и 4 с напряженностью магнитного поля 20, 40 и 60 кА/м (рис. 1).

После магнитной обработки из композиционной смеси формировали образцы для испытаний и исследования структуры. Образцы изготавливали методом прямого прессования при комнатной температуре и давлении 50–60 МПа. Термообработку отпрессованных образцов осуществляли при температуре 380 ± 5 °С. Время выдержки составляло 5 мин на 1 мм толщины образца. Для испытаний на трение изготавливали образцы в виде сегментов шириной 0,012 м и длиной по дуге 0,020 м (рис. 2).

Микроструктурные исследования проводили на инвертированном металлографическом микроскопе МИ-1 с использованием оптического контрастирования по методу темного поля [15]. Микроструктуру материала образцов исследовали на поверхности трения, поверхности среза, и на боковой поверхности, сформированной при прессовании и не подвергавшейся в дальнейшем какому-либо воздействию (рис. 2).

Рентгеноструктурный анализ выполнен в излучении $\text{Cu}_{K\alpha}$ на установке ДРОН-3, оснащенной аппаратно-программным комплексом для управления дифрактометром и обработки результатов измерений.

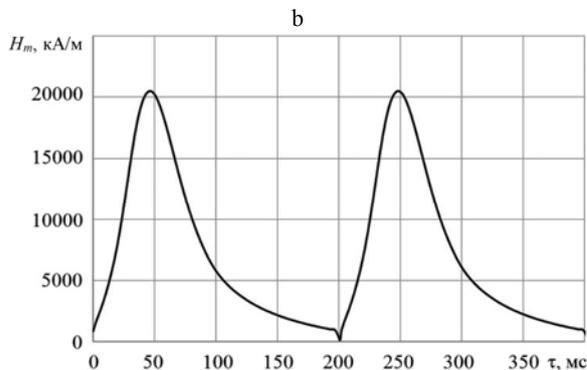
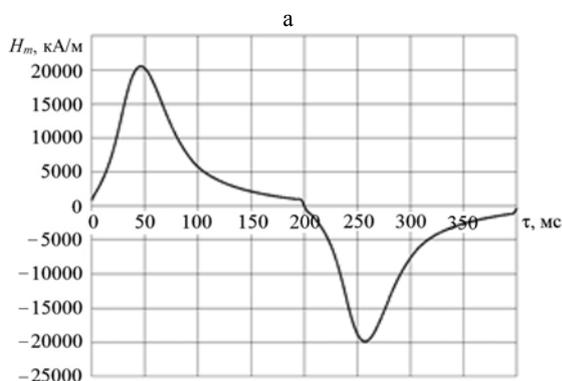


Рис. 1. Форма электромагнитного импульса: а – двухполярный; б – однополярный

Fig. 1. Shape of electromagnetic pulse: a – bipolar; b – unipolar

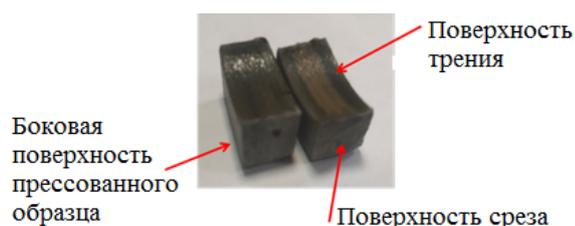


Рис. 2. Образцы после испытаний на трение (образец из композиционной смеси, обработанной магнитным полем, – справа)

Fig. 2. Samples after friction tests (sample from a composite mixture treated with a magnetic field is on the right)

Фазовый анализ проведен по общепринятой методике. Статические смещения атомов из положения равновесия определяли по соотношению [16]

$$\bar{u}_{ст} = \frac{3a^2 \ln \left[\frac{(I)_{эталона}}{(I)_{образца}} \right]}{4\pi^2 \left[(h^2 + l^2 + k^2) \right]}, \quad (1)$$

где $I_{образца}$ – интегральная интенсивность линии образца; $I_{эталона}$ – интегральная интенсивность линии эталона; h, k, l – индексы Миллера; a – параметр кристаллической решетки.

Определение смещений проведено для линии (111) Cu. В качестве эталона принимали образец, не подвергавшийся воздействию магнитного поля.

Результаты и их обсуждение

На поверхности образца, отпрессованного из необработанной магнитным полем смеси, наблюдается полимерное связующее и отдельные включения базальтового волокна; медный наполнитель практически не определяется (рис. 3а). После обработки композиционной

смеси двумя импульсами магнитного поля напряженностью 20 кА/м (биполярный импульс) более контрастно проявляются фрагменты базальтового волокна, а также частицы медного порошка (рис. 3б). Следует также отметить изменение цвета композиции. После увеличения количества импульсов до четырех структура прессованного образца проявляется более отчетливо (рис. 3с). Полимерная фаза становится более однородной, хорошо видны базальтовые волокна. Частицы медного порошка наблюдаются в своем естественном цвете. При повышении напряженности поля до 40 кА/м для формирования структуры, аналогичной представленной на рис. 3с, достаточно двух биполярных импульсов (рис. 4а). После увеличения количества импульсов до четырех структура поверхности не изменяется (рис. 4б). При обработке двумя однополярными импульсами напряженностью 20 кА/м формируется аналогичная структура (рис. 4с). При напряженности магнитного поля до 60 кА/м структура формируется аналогично таковой при напряженности 40 кА/м.

Обработка импульсным магнитным полем влияет также и на морфологию поверхности среза, сформированную инструментом при разрезке кольцевой заготовки на отдельные образцы (рис. 5). Обработка приводит к формированию менее развитого рельефа поверхности; эффект интенсифицируется при увеличении количества импульсов от двух до четырех (рис. 5с), а также при увеличении напряженности поля (рис. 6а). Применение однополярного импульса способствует повышению однородности структуры материала поверхности среза при четырех импульсах магнитного поля напряженностью 40 кА/м (рис. 6б, с).

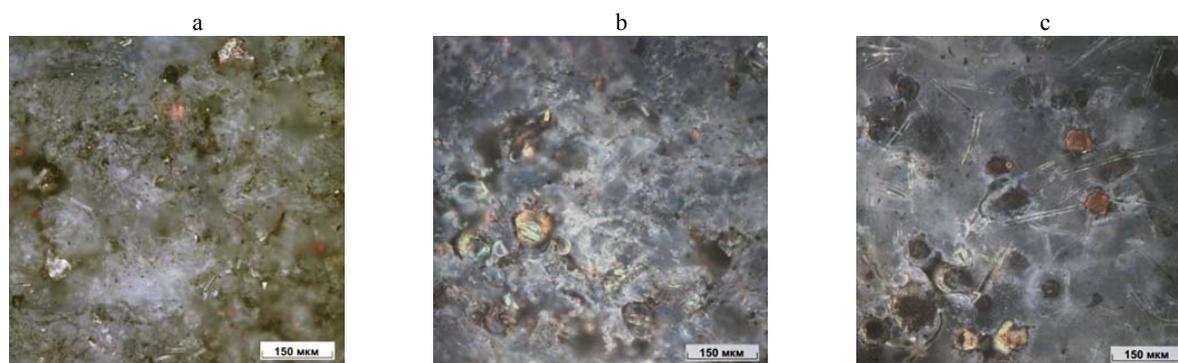


Рис. 3. Структура поверхности прессованного образца композита: а – без воздействия поля; б, с – обработка магнитным полем напряженностью 20 кА/м, 2 и 4 импульса соответственно, двухполярный импульс

Fig. 3. Surface structure of a pressed composite sample: а – without field exposure; б, с – treatment with a magnetic field of 20 кА/м, 2 and 4 pulses, respectively, bipolar pulse

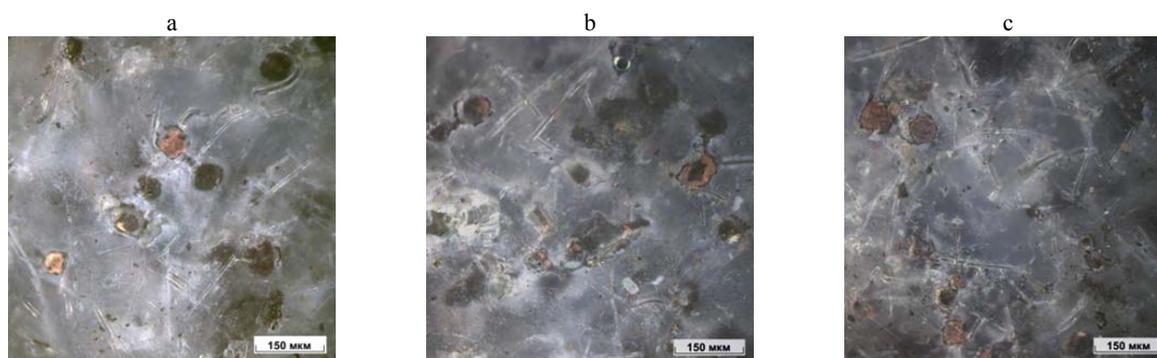


Рис. 4. Структура поверхности прессованного образца: а, б – обработка магнитным полем напряженностью 40 кА/м, 2 и 4 импульса соответственно; с – 20 кА/м, 2 импульса; а, б – двухполярный импульс; с – однополярный импульс
 Fig. 4. Surface structure of the pressed sample: а, б — treatment with a magnetic field of 40 kA/m, 2 and 4 pulses, respectively; с – 20 kA/m, 2 pulses; а, б – bipolar pulse; с – unipolar pulse

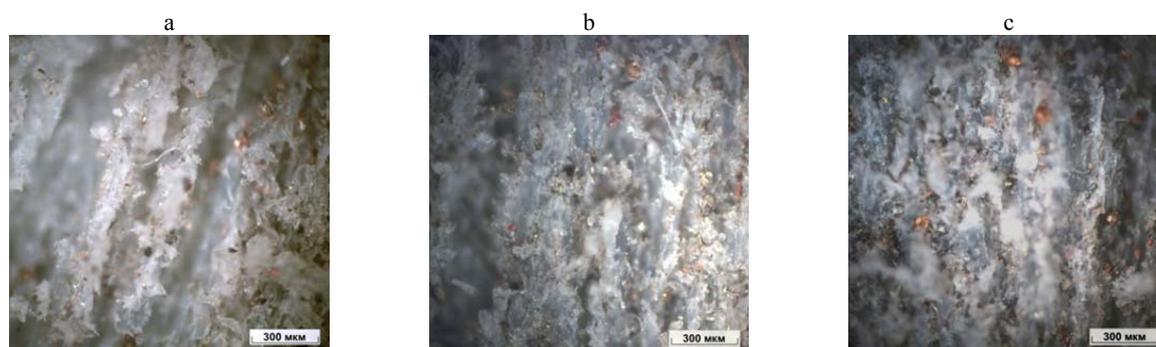


Рис. 5. Структура поверхности среза: а – без воздействия поля; б, с – обработка магнитным полем напряженностью 20 кА/м, 2 и 4 импульса соответственно; двухполярный импульс
 Fig. 5. Structure of the cut surface: а – without field effect; б, с – treatment with a magnetic field of 20 kA/m, 2 and 4 pulses, respectively; bipolar pulse

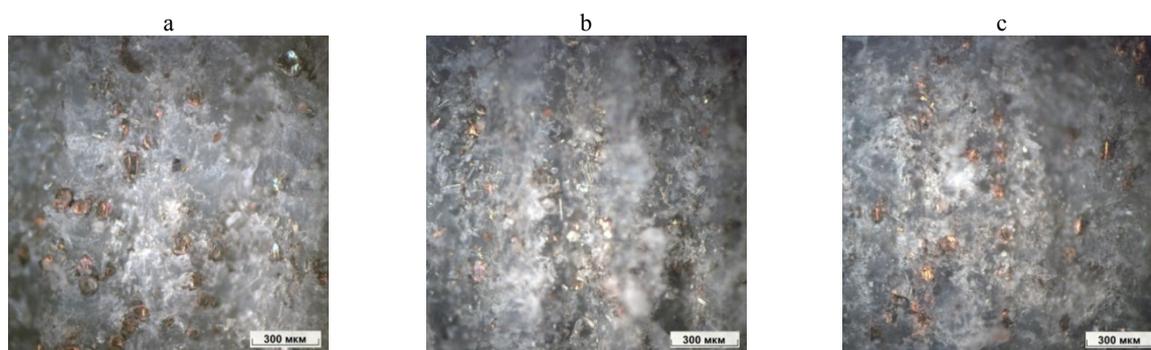


Рис. 6. Структура поверхности среза: а – 40 кА/м, 4 импульса, двухполярный импульс; б, с – 20 кА/м, 2 и 4 импульса соответственно, однополярный импульс
 Fig. 6. Structure of the cut surface: а – 40 kA/m, 4 pulses, bipolar pulse; б, с – 20 kA/m, 2 and 4 pulses respectively, unipolar pulse

Магнитная обработка существенно влияет на морфологию поверхности трения. На образцах, не обработанных магнитным полем, наблюдается картина вязкопластического течения материала. Интенсивно формируется «третье» тело в виде пленок переноса. Обра-

зовавшиеся пленки ориентированы в направлении трения и имеют высокую прочность адгезионного сцепления с материалом образца (рис. 7а, б). Медная фаза декорируется продуктами износа, в особенности в центре образца.

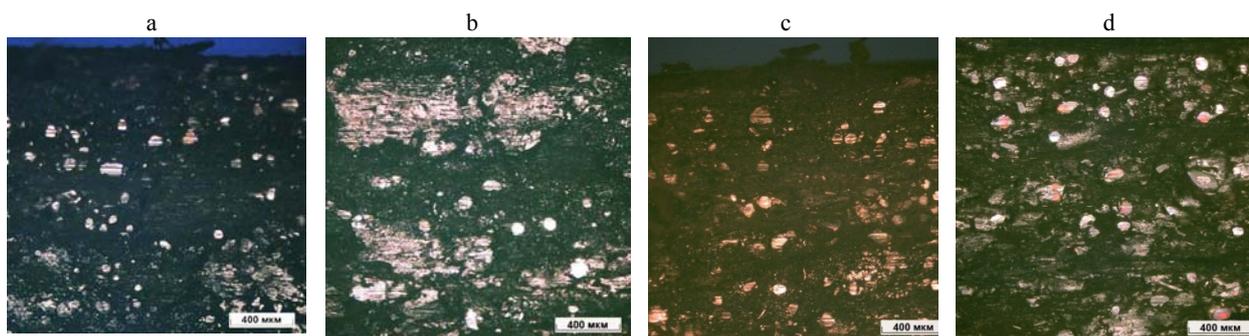


Рис. 7. Структура поверхности трения: а, б – без обработки магнитным полем; с, d – после обработки; а, с – периферийная область образца; б, d – центр

Fig. 7. Structure of the friction surface: a, b – without magnetic field treatment; c, d – after treatment; a, c – peripheral region of the sample; b, d – center

После обработки композиционной смеси в магнитном поле картина трения изменяется (рис. 7с, d). Полимерная фаза не демонстрирует наличия вязких участков. Неоднородность структуры материала (различия в периферийной области трения и в центре образца) снижается, проявляется натуральный цвет медной фазы. Пленки переноса формируются менее интенсивно и не перекрывают всю поверхность трения. При используемом увеличении (50 крат) не зафиксировано изменений морфологии поверхности трения в зависимости от режима воздействия магнитного поля.

Фазовый рентгеноструктурный анализ показывает наличие в композиционной смеси полимера $(CF_2)_n$ и меди (табл. 1). Базальтовое волокно не дает отдельных интерференционных линий на рентгенограмме, на ней проявляется гало, характерное для аморфных материа-

лов (рис. 8). Фазовый состав композиционной смеси после воздействия магнитного поля не изменяется.

Таблица 1

Фазовый состав композиционной смеси
Phase composition of the composite mixture

№ п/п	Угол 2θ , град.	Межплоскостное расстояние, Å	Фаза (hkl), интенсивность табл., %
1	18,65	4,754	$(CF_2)_n$, 100 %
2	32,18	2,779	$(CF_2)_n$
3	37,37	2,404	$(CF_2)_n$
4	41,86	2,156	$(CF_2)_n$
5	43,40	2,083	Cu, (111), 100 %
6	50,38	1,810	Cu, (200), 46 %
7	74,12	1,278	Cu, (220), 20 %
8	89,60	1,093	Cu, (311), 17 %

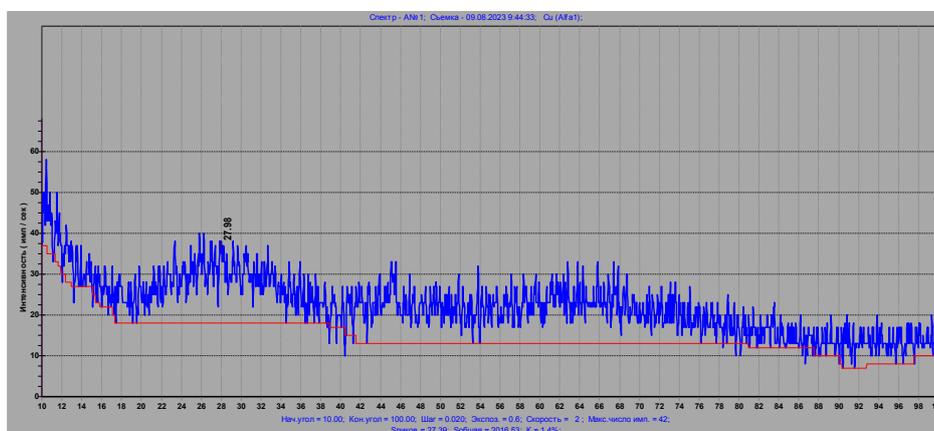


Рис. 8. Рентгенограмма базальтового волокна

Fig. 8. X-ray image of basalt fiber

На рис. 9–11 представлены участки рентгенограмм композиционной смеси после различных режимов обработки магнитным полем. Характерным рентгеновским эффектом является изменение относительной интенсивности интерференционных линий как полимера $(CF_2)_n$, так и меди. При обработке фрикционной смеси двумя двухполярными импульсами относительное изменение интенсивности линий минимально; эффект изменения повышается для напряженности поля 60 кА/м. В наибольшей степени эффект обработки проявляется для режима четырех импульсов с напряженностью 40 кА/м, что согласуется с изменением структуры (рис. 4).

При использовании однополярного импульса эффект проявляется уже при двух импульсах с напряженностью 20 и 40 кА/м. Другие режимы показывают менее выраженный результат. Рентгенограммы для режимов четырех импульсов с напряженностью 40 кА/м

и двух импульсов с напряженностью 20 кА/м практически подобны, что также согласуется с результатами исследования структуры, представленными на рис. 4.

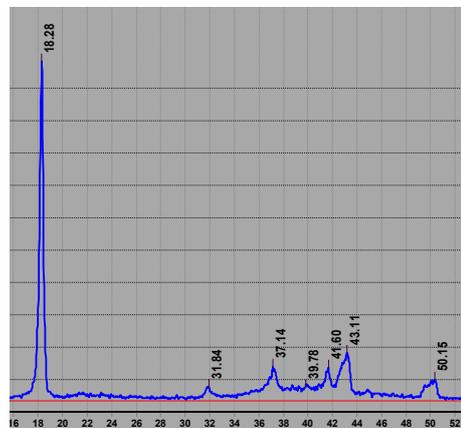


Рис. 9. Фрагмент рентгенограммы образца в исходном состоянии

Fig. 9. Fragment of the X-ray diffraction pattern of the sample in its original state

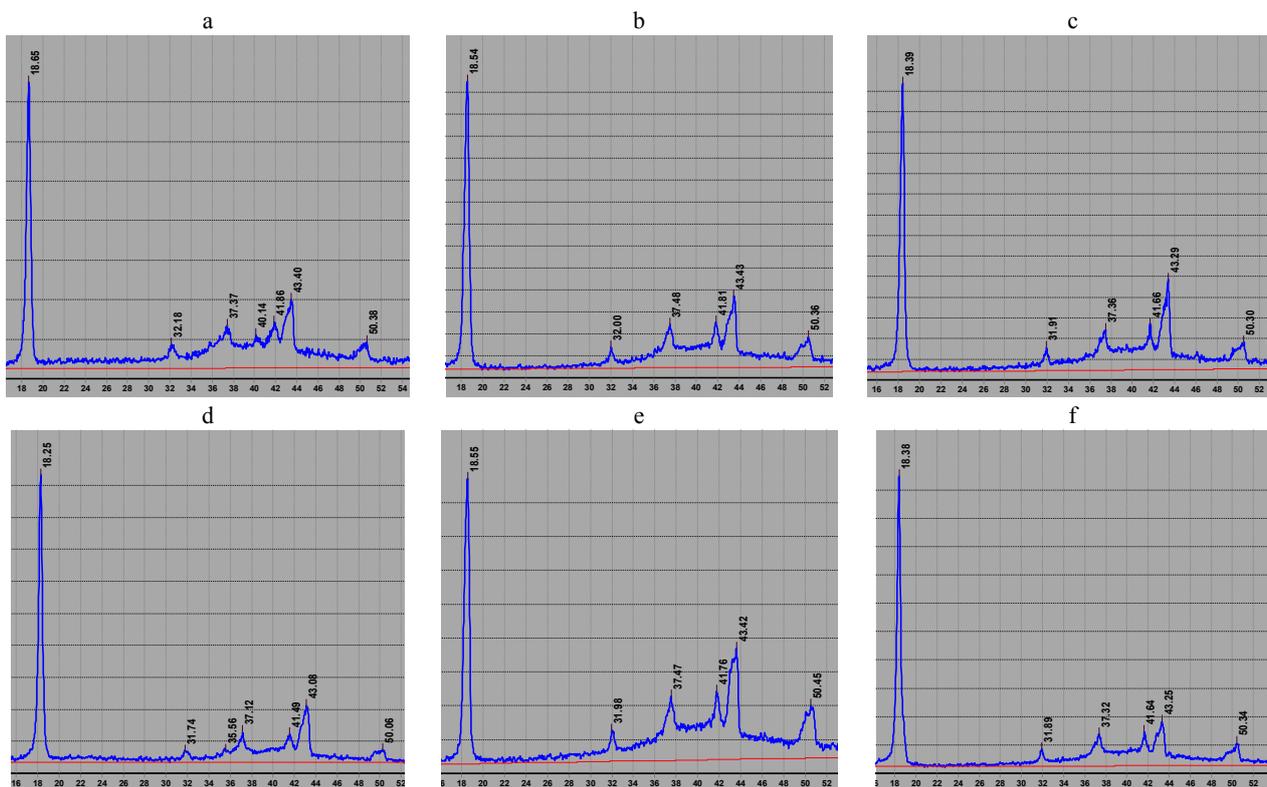


Рис. 10. Характерный участок рентгенограмм композиционной смеси после воздействия магнитного поля, двухполярный импульс: а, b, с – два импульса с напряженностью поля 20, 40 и 60 кА/м соответственно; d, e, f – четыре импульса с напряженностью поля 20, 40 и 60 кА/м соответственно

Fig. 10. Characteristic section of X-ray diffraction patterns of composite mixture after exposure to magnetic field, bipolar pulse: a, b, c – two pulses with field strength of 20, 40 and 60 kA/m, respectively; d, e, f – four pulses with field strength of 20, 40 and 60 kA/m, respectively

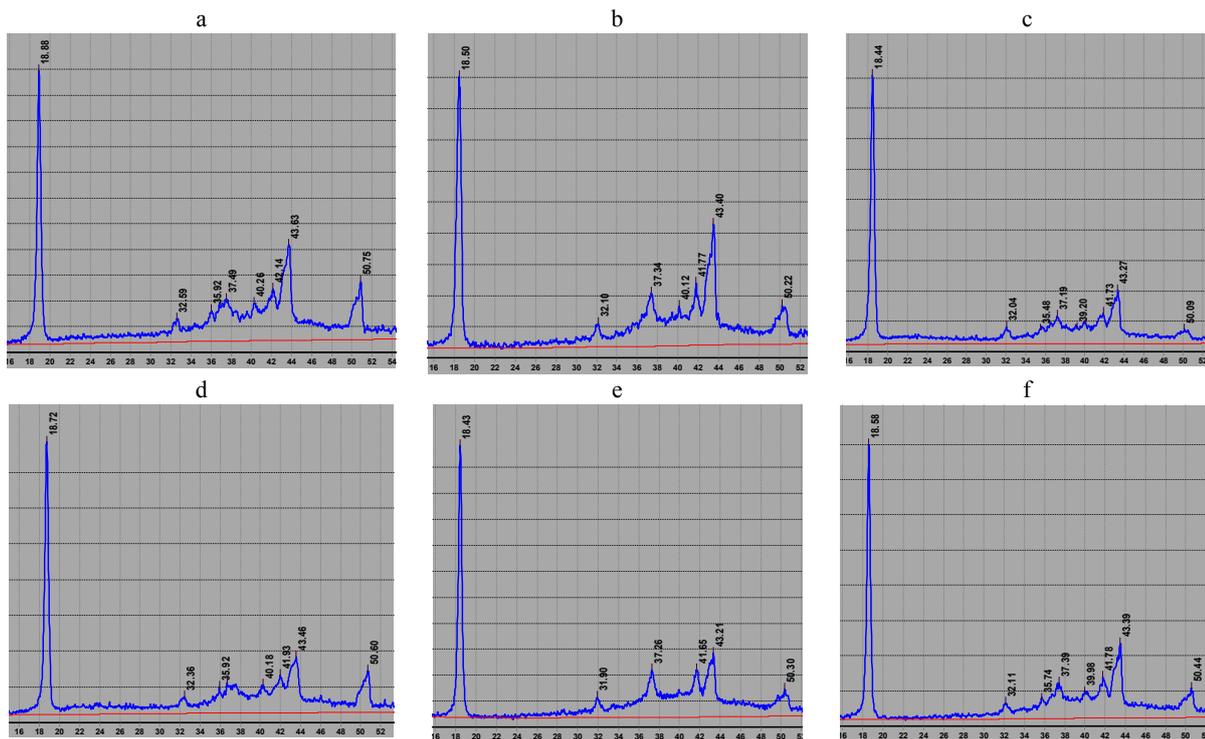


Рис. 11. Характерный участок рентгенограмм композиционной смеси после воздействия магнитного поля, однополярный импульс: а, б, с – два импульса с напряженностью поля 20, 40 и 60 кА/м соответственно; д, е, ф – четыре импульса с напряженностью поля 20, 40 и 60 кА/м соответственно

Fig. 11. Characteristic section of X-ray diffraction patterns of a composite mixture after exposure to a magnetic field, unipolar pulse: а, б, с — two pulses with a field strength of 20, 40 and 60 kA/m, respectively; д, е, ф – four pulses with a field strength of 20, 40 and 60 kA/m, respectively

Применительно к металлам изменение интенсивности линий рентгенограммы может быть связано с несколькими процессами:

- формированием текстуры;
- изменением величины блоков когерентного рассеяния;
- образованием дефектов упаковки;
- статическими смещениями атомов из положений равновесия.

Воздействие магнитного поля на медную компоненту смеси не связано с пластической деформацией или с повышением температуры; разогрев смеси в магнитном поле не наблюдался. Давление 50 МПа и температура 380 °С при прессовании композиционной смеси для меди несущественны с точки зрения изменения внутренней структуры. Поэтому первые три процесса в медной фазе представляются маловероятными. Наиболее вероятной причиной изменения относительной интенсивности интерференционных линий меди является изменение статических смещений атомов из положений равновесия (напряжения 3-го рода).

Под воздействием импульсного магнитного поля происходят изменения тонкой структуры меди [17], в частности наблюдали начальные стадии формирования ячеистой дислокационной структуры. Как характерный эффект магнитного воздействия было отмечено формирование двойников и ступенчатых высокоугловых границ [17, 18]. Такие изменения структуры связаны с перемещением атомов на расстояния, не кратные межплоскостным.

Представления о напряжениях 3-го рода используются для описания процессов формирования твердых растворов, влияния примесей на структуру и свойства материалов, а также описания фазовых превращений [19–22]. Напряжения 3-го рода возникают при переходах атомов через потенциальные барьеры, то есть при перемещениях атомов на расстояния, не меньшие половины межатомного расстояния [23]. При больших перемещениях атомы соседних слоев могут не попадать полностью в положения минимумов, соответствующих равновесной решетке, и часть атомов занима-

ет промежуточные положения равновесия. Напряжения 3-го рода возникают при переходе через предел упругости и являются метастабильными нарушениями кристаллической структуры, при этом искажения охватывают объем в несколько элементарных ячеек. Этим искажениям соответствуют смещения атомов, нарушающие регулярность структуры. Смещения атомов, связанные с искажениями 3-го рода, носят статический характер и концентрируются в местах наибольших нарушений правильности структуры – на границах зерен и двойников, блоков когерентного рассеяния.

Энергию напряжений 3-го рода можно оценить по формуле, аналогичной формуле для теплоты, идущей на нагревание тела:

$$\Delta U = \frac{1}{2} c \Delta T, \quad (2)$$

где c – теплоемкость; ΔT – эффективная температура.

Величина энергии ΔU по порядку совпадает с энергией внутренних напряжений, измеряемой в калориметрических опытах. При пластической деформации на напряжения 3-го рода приходится 98 % общей поглощенной энергии [23].

Возможность изменения структуры меди в магнитном поле подтверждается существованием в диамагнитных металлах магнитокалорического эффекта [24].

В качестве гипотезы о механизмах влияния магнитного поля на структуру политетрафторэтилена (ПТФЭ) можно предположить,

что под воздействием магнитного поля происходит изменение спиральной конформации ПТФЭ. Молекулы в зависимости от режимов обработки скручиваются–раскручиваются подобно тому, как это происходит вблизи температур фазовых переходов, оставаясь при этом в кристаллическом состоянии. Воздействие магнитным полем приводит к изменению жесткости молекулярной цепи ПТФЭ, в результате чего изменяется спиральная конформация ПТФЭ. Конформационный гистерезис для процессов «скрутки-раскрутки» молекул при воздействии магнитного поля способствует изменению структуры и свойств материала.

По рентгеновским данным рассчитаны относительные статические смещения атомов меди из положений равновесия (рис. 12). Полученные результаты коррелируют с изменением структуры (рис. 3, 4) и свойств [13]. Для двухполярного импульса наилучшая структура соответствует режиму четырех импульсов с напряженностью 20 кА/м, для однополярного – двух импульсов с напряженностью 20 кА/м. Этому соответствует максимальное изменение значения атомных смещений. По-видимому, обработка в магнитном поле способствует формированию равновесной структуры за счет совершенствования кристаллической решетки меди.

Описанные структурные изменения определяют результаты динамического механического анализа образцов, отпрессованных из композиционных материалов, обработанных в магнитном поле [13].

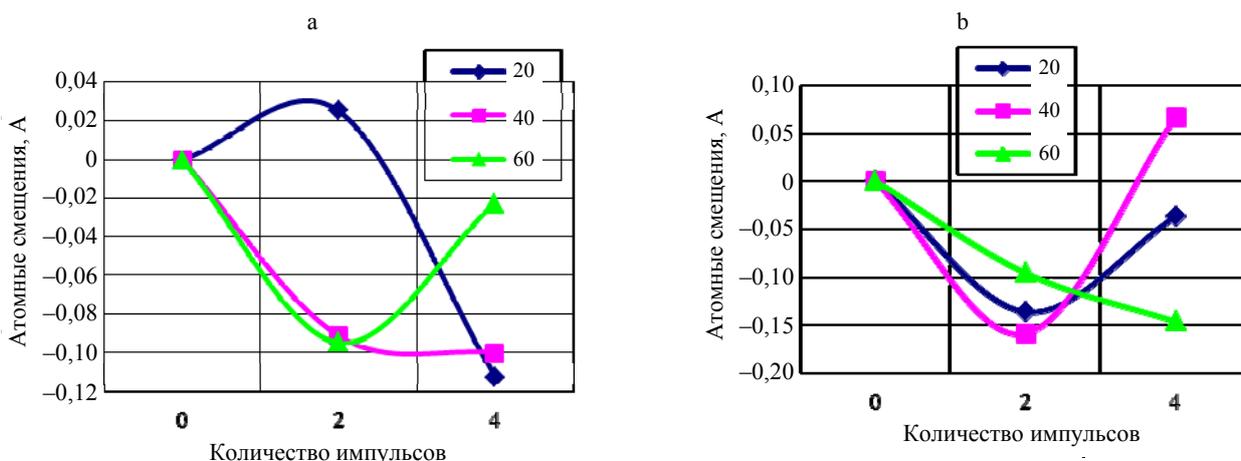


Рис. 12. Изменение статических смещений атомов меди в зависимости от количества импульсов и напряженности магнитного поля: а – двухполярный импульс; б – однополярный импульс

Fig. 12. Change in static displacements of copper atoms depending on the number of pulses and magnetic field strength: а – bipolar pulse; б – unipolar pulse

Сравнение эффектов обработки одно- и двухполярными импульсами показывает, что при обработке двумя импульсами с напряженностью $H_m = 20$ кА/м в области температур до релаксационного α -перехода однополярный режим обработки повышает, а двухполярный – снижает тангенс угла механических потерь ($\text{tg}\delta$) до 7 % по сравнению с необработанным композитом. Динамический модуль упругости E_d возрастает во всем температурном диапазоне до 12,5 % независимо от полярности режима обработки, при этом с увеличением температуры влияние обработки на E_d снижается. Повышение напряженности поля до значений 40–60 кА/м не оказывает существенного влияния на структуру и свойства полимерного композита.

ВЫВОДЫ

1. Установлено существенное влияние предварительной обработки магнитным полем фрикционной смеси (медный порошок, политетрафторэтилен, базальтовое волокно) на структуру прессованных образцов, а также поверхность реза и морфологию поверхности трения.

2. Показано, что существенное значение имеют количество импульсов магнитного поля, а также полярность импульсов. Оптимальное значение напряженности магнитного поля составило 20 кА/м; наиболее результативно применение униполярных импульсов.

3. Одним из физических механизмов, ответственных за изменение структуры и свойств материалов на основе ПТФЭ при воздействии магнитного поля, можно считать образование статических смещений атомов меди из положения равновесия, что означает изменение уровня напряжений 3-го рода.

4. В качестве гипотезы высказано предположение, что воздействие магнитным полем приводит к изменению жесткости молекулярной цепи ПТФЭ, в результате чего изменяется спиральная конформация ПТФЭ. Эти изменения влияют на значения структурно-чувствительных показателей свойств композита, в качестве которых в данном исследовании использованы механические динамические характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моргунов, Р. Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности / Р. Б. Моргунов // Успехи физических наук. 2004. Т. 174, № 2. С. 131–153. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0174.200402c.0131>.
2. Волчков, И. С. Влияние слабых магнитных полей на электрические свойства кристаллов CdT / И. С. Волчков, В. М. Каневский, М. Д. Павлюк // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. Вып. 4. С. 276–279. <https://doi.org/10.7868/S0370274X18040124>.
3. Физическая кинетика движения дислокаций в немагнитных кристаллах: взгляд через магнитное окно / В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева [и др.] // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. С. 327–341. <https://doi.org/10.3367/UFNR.2016.07.037869>.
4. Головин, Ю. И. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) / Ю. И. Головин // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 5. С. 76–803.
5. Improvement of the wear Resistance of Nickel Aluminium Bronze and 2014-T6 Aluminium Alloy by Application of Alternating Magnetic Field Treatment / S. Akrama, A. Babutskyi, A. Chrysanthou [et al.] // Wear. 2021. Vol. 480–481. Art. 203940. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203940>.
6. Licai, Fu. Effect of Applied Magnetics Field on Wear Behaviour of Martensitic Steel / Licai Fu, Lingping Zhou // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8, No 3. P. 2880–2886. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.026>.
7. Икромов, Н. А. Исследование влияния магнитного поля на физико-механические свойства композиционных полимерных покрытий / Н. А. Икромов // Вестник КГУ. 2015. № 3: Сер. Технические науки. Вып. 10. С. 97–99.
8. Влияние неоднородного магнитного поля на физические свойства металлосодержащих полимерных композитов / В. Н. Билык, Г. В. Кирик, О. Г. Медведовская [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. 2014. Т. 36, № 12. С. 1641–1650.
9. Влияние постоянного магнитного поля на структуру и свойства композитов на основе несовместимых полимеров / В. А. Виленский, Ю. Ю. Керча, Г. Е. Глиевая, В. А. Овсянкина // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2005. Т. 47, № 12. С. 2130–2139.
10. Microstructure and Wear Resistance of Electromagnetic Field Assisted Multi Layer Laser Clad Fe901 Coating / Lei Huang, Jianzhong Zhou, Jiale Xu [et al.] // Surface & Coatings Technology. 2020. No 395. P. 125–876. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125876>.
11. Влияние обработки высокочастотным электромагнитным полем на динамические механические и триботехнические характеристики фрикционных композитов с терморезистивной полимерной матрицей / В. П. Сергиенко, С. Н. Бухаров, А. Г. Анисович [и др.] // Трение и износ. 2021. Т. 42, № 6. С. 619–628. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-6-619-628>.
12. Модифицирование физико-механических свойств фрикционных композитов с полимерной матрицей воздействием модулированного по амплитуде высокочастотного электромагнитного поля / В. В. Ажаронко, А. Г. Анисович, В. В. Бирин [и др.] // Электронная обработка материалов. 2014. Т. 50, № 3. С. 16–22.
13. Влияние обработки в магнитном поле на трибоакустические характеристики медьсодержащих полимерных фрикционных композитов / В. П. Сергиенко, С. Н. Бухаров, А. Г. Анисович [и др.] // Трение и износ. 2024. Т. 45, № 3. С. 187–198. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2024-45-3-187-198>.
14. Прибор для измерения магнитной индукции ферромагнитных стержней в процессе импульсного намагничивания перемагничивания / З. М. Короткевич, В. Ф. Матюк, В. Л. Цукерман, А. А. Осипов // Приборостроение 2013: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 20–22 нояб. 2013 / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. Минск: БНТУ, 2013. С. 70–72.
15. Анисович, А. Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. 2016. № 1. С. 36–42.
16. Миркин, М. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / М. И. Миркин. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. 862 с.
17. Структурообразование в меди под воздействием импульсного магнитного поля / Г. Н. Здор, Р. Л. Тофпенец, А. Г. Анисович, И. А. Зарецкий // Известия Российской академии наук. Сер. физическая. 1995. Т. 59, № 10. С. 65–71.

18. Давыдов, С. В. Эффективность магнитно-импульсной обработки / С. В. Давыдов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2007. № 3. С. 89.
19. Gurskii, Z. The Role of Atomic Static Displacements in Binary-Alloy Formation / Z. Gurskii, J. Krawczyk // *Physica B: Condensed Matter*. 2003. Vol. 337, No 1–4. P. 255–265. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(03\)00412-5](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(03)00412-5).
20. Cayron, C. Continuous Atomic Displacements and Lattice Distortion During Fcc-Bcc Martensitic Transformation / C. Cayron // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 96. P. 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.010>.
21. Feng, Peng. Modulated Fluctuation of Atomic Displacement in a Crystal with a Single Impurity / Feng Peng // *Physica B: Condensed Matter*. 2006. Vol. 373, No 3. P. 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.11.166>.
22. Михайлов, Ю. Н. Длинноволновые статические смещения атомов в сплавах γ -FeNi / Ю. Н. Михайлов, С. Ф. Дубинин // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 12. С. 2113–2118.
23. Жданов, Г. С. Физика твердого тела / Г. С. Жданов. М.: МГУ, 1961. 502 с.
24. Анисович, А. Г. Изменение теплового состояния диамагнитных металлов под воздействием магнитного поля / А. Г. Анисович, Е. И. Марукович, Т. Н. Абраменко // Металлы. 2003. № 6. С. 108–110.
25. Surface & Coatings Technology, 395, 125–876. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125876>.
11. Sergienko V. P., Bukharov S. N., Anisovich A. G., Abed N. S., Grigoriev A. Ya. (2021) The Influence of High-Frequency Electromagnetic Field Treatment on the Dynamic Mechanical and Tribo-Technical Characteristics of Friction Composites with A Thermosetting Polymer Matrix. *Journal of Friction and Wear*, 42 (6), 401–407. <https://doi.org/10.3103/s106836662106009x>.
12. Azharonok V. V., Anisovich A. G., Biran V. V., Bukharov S. N., Sergienko V. P., Filatova I. I. (2014). Modification of Physico-mechanical Properties of Friction Composites with A Polymer Matrix under the Influence of An Amplitude-Modulated High-Frequency Electromagnetic Field. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 50 (4), 300–305. <https://doi.org/10.3103/s1068375514040024>.
13. Sergienko V. P., Bukharov S. N., Anisovich A. G., Merinov V. K., Abed N. S., Alexiev A. R. (2024) Effect of Treatment in a Magnetic Field on the Triboacoustic Characteristics of Copper-Containing Polymer Friction Composites. *Journal of Friction and Wear*, 45 (3), 123–131. <https://doi.org/10.3103/s1068366624700193>.
14. Korotkevich Z. M., Matyuk V. F., Tsukerman V. L., Osipov A. A. (2013) A Device for Measuring the Magnetic Induction of Ferromagnetic Rods in the Process of Pulsed Magnetization and Magnetization Reversal. *Priboroostroenie 2013: materialy 6-i Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Minsk, 20–22 noyab. 2013* [Instrument Engineering 2013: Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference, Minsk, 20–22 November 2013]. Minsk, Belarusian National Technical University, 70–72 (in Russian).
15. Anisovich A. G. (2016) The Art of Metallography: Using Optical Contrast Technique. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, (1), 36–42.
16. Mirkin M. I. (1961) *Handbook on X-Ray Diffraction Analysis of Polycrystals*. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature. 862 (in Russian).
17. Zdor G. N., Tofpenets R. L., Anisovich A. G., Zaretskii I. A. (1995) Structure Formation in Copper under the Influence of A Pulsed Magnetic Field. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 59 (10), 65–71 (in Russian).
18. Davydov S. V. (2007) Efficiency of Magnetic Pulse Processing. *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University*, (3), 89 (in Russian).
19. Gurskii Z., Krawczyk J. (2003) The Role of Atomic Static Displacements in Binary-Alloy Formation. *Physica B: Condensed Matter*, 337 (1–4), 255–265. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(03\)00412-5](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(03)00412-5).
20. Cayron C. (2015) Continuous Atomic Displacements and Lattice Distortion During Fcc-Bcc Martensitic Transformation. *Acta Materialia*, 96, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.010>.
21. Peng F. (2006) Modulated Fluctuation of Atomic Displacement in a Crystal with a Single Impurity. *Physica B: Condensed Matter*, 373 (2), 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.11.166>.
22. Mikhailov Yu. N., Dubinin S. F. (2004) Long-Wavelength Static Atomic Displacements in γ -FeNi Alloys. *Physics of the Solid State*, 46 (12), 2185–2190. <https://doi.org/10.1134/1.1841377>.
23. Zhdanov G. S. (1961) *Solid State Physics*. Moscow, Moscow State University. 502 (in Russian).
24. Anisovich A. G., Marukovich E. I., Abramenko T. N. (2003) Changes in the Thermal state of Diamagnetic Metals in an Applied Magnetic Field. *Russian Metallurgy (Metally)*, (6), 108–110 (in Russian).

Received: 31.10.2024

Accepted: 09.01.2025

Published online: 31.03.2025

REFERENCES

Поступила 31.10.2024
Подписана в печать 09.01.2025
Опубликована онлайн 31.03.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-109-117>

УДК 621.9.047.7

Влияние анодных режимов обработки в электролитах на съём металла и выход по току

Канд. техн. наук, доц. А. Ю. Королёв¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Установлено влияние анодных режимов (электрохимический, коммутационный, электролитно-плазменный) при обработке стали AISI 321 в водном растворе сульфата аммония концентрацией 5 %, широко применяемом в практике электролитно-плазменной обработки коррозионноустойчивых сталей, на съём металла, выход по току и затрачиваемую удельную энергию. Наибольший съём металла отмечается на границе электрохимического и коммутационного режимов, а также в области коммутационного режима. В зависимости от температуры электролита максимальный съём при этом превышает значения, соответствующие электролитно-плазменному режиму, в 6–8 раз. В области значений напряжения, соответствующей электролитно-плазменному режиму, коэффициент выхода металла по току η существенно выше, чем при значениях напряжения, соответствующих электрохимическому и коммутационному режимам. В зависимости от температуры электролита значения η находятся в следующих диапазонах: в электролитно-плазменном режиме – 0,40–0,62; в коммутационном – 0,18–0,24; в электрохимическом – 0,16–0,24. В электролитно-плазменном режиме (210–330 В) максимум коэффициента η обеспечивается в области температуры электролита 70–80 °С. Электролитно-плазменный режим характеризуется большими энергозатратами на единицу массы удаленного металла ($q/\Delta m$) по сравнению с электрохимическим режимом. Так, при температуре 80 °С в электрохимическом режиме в диапазоне напряжения 10–70 В параметр $q/\Delta m$ принимает значения 0,04–0,31 Вт·ч/(см²·мг), а в электролитно-плазменном режиме (120–330 В) – 0,14–0,50 Вт·ч/(см²·мг). При температуре 90 °С в электролитно-плазменном режиме значение параметра $q/\Delta m$ изменяется от 0,26 до 0,63 Вт·ч/(см²·мг). Полученные результаты являются основой для создания эффективных комплексных процессов повышения качества поверхности и размерной обработки, при которых в одной стадии совмещается как электролитно-плазменный, так и электрохимический режимы обработки. Такая схема обработки позволяет использовать преимущества каждого из анодных режимов: интенсивный съём металла при низких энергозатратах в электрохимическом режиме и полирование с достижением высокого качества поверхности в электролитно-плазменном режиме.

Ключевые слова: анодная обработка, электролитно-плазменный режим, коммутационный режим, электрохимический режим, плотность тока, съём металла, выход по току

Для цитирования: Королёв, А. Ю. Влияние анодных режимов обработки в электролитах на съём металла и выход по току / А. Ю. Королёв // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 109–117. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-109-117>

Effect of Anodic Treatment Modes in Electrolytes on Metal Removal and Current Efficiency

A. Yu. Korolyov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The effect of anode modes (electrochemical, switching, electrolyte-plasma) in the treatment of AISI 321 steel in an aqueous solution of ammonium sulfate with a concentration of 5 %, which is widely used in the practice of electrolyte-plasma treatment of corrosion-resistant steels, on metal removal, current efficiency and specific energy spent, has been established. The greatest metal removal is observed at the border of the electrochemical and switching modes, as well as in the area of the switching mode. Depending on the electrolyte temperature, the maximum removal in this case exceeds the values

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 374-25-98
korolyov@park.bntu.by

Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 374-25-98
korolyov@park.bntu.by

corresponding to the electrolyte-plasma mode by 6–8 times. In the region of voltage values corresponding to the electrolyte-plasma mode, the coefficient of metal current efficiency η is significantly higher than at voltage values corresponding to electrochemical and switching modes. Depending on the electrolyte temperature, the values of η are in the following ranges: in electrolyte-plasma mode – 0.40–0.62; in switching – 0.18–0.24; in electrochemical – 0.16–0.24. In the electrolyte-plasma mode (210–330 V), the maximum coefficient η is provided in the region of the electrolyte temperature range of 70–80 °C. The electrolyte-plasma mode is characterized by high energy consumption per unit mass of removed metal ($q/\Delta m$) compared to the electrochemical mode. So, at a temperature of 80 °C in the electrochemical mode in the voltage range of 10–70 V, the parameter $q/\Delta m$ takes values of 0.04–0.31 W·h/(cm²·mg), and in an electrolyte-plasma mode (120–330 V) – 0.14–0.50 W·h/(cm²·mg). At a temperature of 90 °C in the electrolyte-plasma mode, the value of the parameter $q/\Delta m$ varies from 0.26 to 0.63 W·h/(cm²·mg). The obtained results are the basis for creating effective complex processes for improving surface quality and dimensional treatment, in which both electrolyte-plasma and electrochemical modes are combined in one stage. This treatment scheme allows to take advantage of each of the anode modes: intensive metal removal at low energy consumption in the electrochemical mode and polishing the surface with the achievement of high surface quality in the electrolyte-plasma mode.

Keywords: anodic treatment, electrolyte-plasma mode, switching mode, electrochemical mode, current density, metal removal, current efficiency

For citation: Korolyov A. Yu. (2025) Effect of Anodic Treatment Modes in Electrolytes on Metal Removal and Current Efficiency. *Science and Technique*. 24 (2), 109–117. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-109-117> (in Russian)

Введение

В качестве альтернативы существующим методам электрохимического полирования широко используется электролитно-плазменная обработка (ЭПО) [1, 2]. Метод обеспечивает полирование, удаление заусенцев и очистку поверхности изделий из металлических материалов [3, 4]. ЭПО по сравнению с механическим и электрохимическим полированием обладает рядом существенных преимуществ, таких как: высокая экологическая безопасность за счет применения электролитов на основе водных растворов солей концентрацией 3–5 %; возможность обработки деталей и изделий любой конфигурации; возможность получения зеркальной поверхности с высотой микронеровностей вплоть до $Ra = 0,01$ мкм; удаление в процессе обработки дефектного поверхностного слоя, что улучшает физико-механические и химические свойства поверхности; короткая продолжительность процесса полирования; существенное снижение ручного труда; возможность обработки высокотвердых и вязких материалов [4–6]. Производительность и экономическая эффективность технологических операций процесса ЭПО в 5–6 раз выше, чем при традиционном электрохимическом полировании в растворах кислот [7].

Общим недостатком ЭПО является большая энергоемкость, связанная, прежде всего, с высоким напряжением, которое требуется для поддержания стабильной парогазовой оболоч-

ки. В процессе ЭПО через парогазовую оболочку протекает ток сравнительно небольшой плотности. При этом его величина определяет производительность обработки или съем металла. Соответственно для повышения эффективности ЭПО (увеличения производительности и снижения энергопотребления) необходимо создать условия обработки, при которых достигается повышенная плотность тока с низкими энергозатратами. Причем такая обработка должна обеспечивать сохранение высокого качества формируемой поверхности.

Большой съем при относительно низком напряжении обеспечивается в электрохимической и (OA) и коммутационной областях (AB) вольт-амперной характеристики анодных режимов в электролитах (рис. 1).

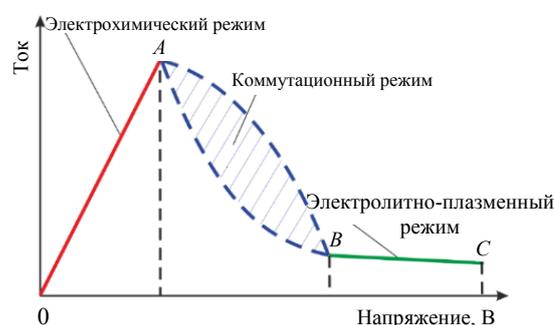


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика анодного процесса в электролите: OA – электрохимический режим; AB – коммутационный режим; BC – электролитно-плазменный режим

Fig. 1. Voltage-current characteristic of the anode process in the electrolyte: OA – electrochemical mode; AB – switching mode; BC – electrolyte-plasma mode

При этом значения напряжения, определяющие границы существования анодных режимов, зависят от тепловых и электрических условий, при которых они реализуются. При равных электрических параметрах эти границы определяются электропроводящими свойствами среды, которые в случае анодной обработки характеризуются составом и температурой применяемого электролита. Недостатком анодной обработки на таких режимах, при условии применения в качестве электролитов водных растворов солей концентрацией 3–5 %, является низкое качество формируемой поверхности.

Высокое качество поверхности с большим съемом металла при условии одностадийной обработки может быть достигнуто при совмещении в одном процессе электрохимического и электролитно-плазменного режима. Для этого необходимо создание электрических условий, при которых происходит возникновение нестационарных режимов [8–10], характеризующихся контролируемым кратковременным переходом из стационарного электролитно-плазменного режима в электрохимический режим, когда обеспечивается интенсивный съем металла с низким энергопотреблением. Таким образом, за счет использования нестационарных режимов становится возможным осуществление комплексного электрохимического и электролитно-плазменного воздействия на обрабатываемую поверхность и создание на их основе эффективных процессов повышения качества поверхности и размерной обработки.

Для разработки нестационарных процессов ЭПО необходимо иметь представление о влиянии анодных режимов и их характеристик на съем металла и выход по току, границах существования анодных режимов, а также величине энергии, которая затрачивается в этих режимах.

Оборудование и методы

Для выполнения исследований использовалась рабочая ванна из коррозионностойкой стали объемом 20 л. Стабилизация температуры электролита в ней выполнялась при помощи системы нагрева (встроенные ТЭНы) и системы охлаждения, состоящей из теплообменника, chillера и барботера. В качестве электролита использовался водный раствор сульфата аммония концентрацией 5 %. Температура электролита изменялась в диапазоне 50–90 °С с шагом 10 °С. Регулировка выходного напряжения источника питания вы-

полнялась с помощью трехфазного ЛАТРа в диапазоне от 0 до 330 В. Продолжительность обработки образцов составляла 3 мин. При этом для каждого из образцов фиксировался характер протекающего анодного режима: электрохимический, коммутационный или электролитно-плазменный.

Среднее значение силы тока в цепи электролит–анод при обработке образцов измерялось мультиметром Victor VC9808 с дискретностью 0,01 А. Масса образцов до и после обработки измерялась на аналитических весах OHAUS Pioneer PA 214C с дискретностью 0,1 мг.

В качестве образцов для выполнения исследований использовали отрезки проволоки из коррозионностойкой стали AISI 321 диаметром 2 мм длиной 40 мм. Для повышения точности определения съема металла и измерения силы тока обработка выполнялась при частичном погружении образцов в электролит на длину 20 мм. Таким образом, площадь обрабатываемой поверхности составляла 1,29 см². Участок образца, граничащий с поверхностью электролита, изолировался втулкой из фторопласта (рис. 2).

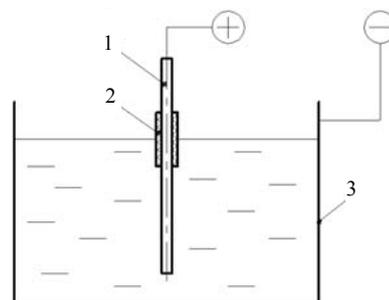


Рис. 2. Схема погружения образцов:
1 – образец (анод); 2 – изолирующая втулка;
3 – ванна с электролитом (катод)

Fig. 2. Sample immersion scheme:
1 – sample (anode); 2 – insulating bushing;
3 – bath with electrolyte (cathode)

Такая схема погружения позволяет локализовать обработку только на необходимом участке образца. Для крепления образца не требуется промежуточная оснастка, поверхность которой также участвует в анодном процессе и соответственно вносит дополнительный вклад в формирование общей силы тока. Наличие изолирующей втулки позволяет избежать пульсаций тока и дополнительного съема металла в области границы электролит–воздух вследствие колебаний

электролита и выхода из прианодной зоны образующейся парогазовой смеси.

Значение коэффициента выхода металла по току η рассчитывалось по формуле [11]

$$\eta = \frac{\Delta m}{\Delta m_{\text{расч}}}, \quad (1)$$

где Δm – фактическая масса удаленного металла; $\Delta m_{\text{расч}}$ – расчетное значение массы удаленного металла,

$$\Delta m_{\text{расч}} = kI\tau, \quad (2)$$

k – электрохимический эквивалент металла (для стали AISI 321 составляет $16,28 \cdot 10^{-3}$ г/(А·мин) [11]; I – измеренная сила тока в цепи электролит–анод; τ – продолжительность обработки.

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные на основании экспериментальных данных зависимости плотности тока и съема металла от рабочего напряжения при различных значениях температуры электролита представлены на рис. 3. Зависимости съема металла и плотности тока хорошо согласуются друг с другом, что подтверждает корректность полученных результатов, поскольку обеспечивается соблюдение закона Фарадея. Температура электролита оказывает решающее влияние как на формируемую плотность тока, так и на границы областей возникновения анодных режимов. Так, при температуре электролита 50 °С максимальная плотность тока составляет 2,64 А/см², а при температуре 90 °С – 11,72 А/см². Съем ме-

талла при этом 25,1 и 108,9 мг/см² соответственно.

При температуре 50 °С электрохимический режим протекает в диапазоне значений рабочего напряжения от 0 до 80 В. В диапазоне от 80 до 210 В действует коммутационный режим. Стабильный электролитно-плазменный режим возникает при напряжении более 210 В. С увеличением температуры электролита область существования электрохимического режима незначительно расширяется. Так, если при температуре 70 °С граница перехода электрохимического режима в коммутационный по-прежнему соответствует напряжению 80 В, то при значениях температуры 80 и 90 °С происходит ее смещение до напряжения 90 В.

Наиболее значимым эффектом, возникающим при повышении температуры электролита, является смещение границы возникновения стабильного электролитно-плазменного режима в область меньших значений напряжения. Так, при температуре 70 °С стабильный электролитно-плазменный режим возникает уже при напряжении 160 В, а при увеличении температуры до 80–90 °С – при 120 В. Это связано с более благоприятными условиями для формирования парогазовой оболочки вокруг анода. Для локального вскипания электролита требуется меньше удельной энергии, что соответственно приводит к уменьшению необходимого для этого напряжения. Поэтому переход в электролитно-плазменный режим происходит раньше, а область коммутационного режима сужается и, например, при температуре электролита 90 °С находится в диапазоне значений напряжения 90–120 В.

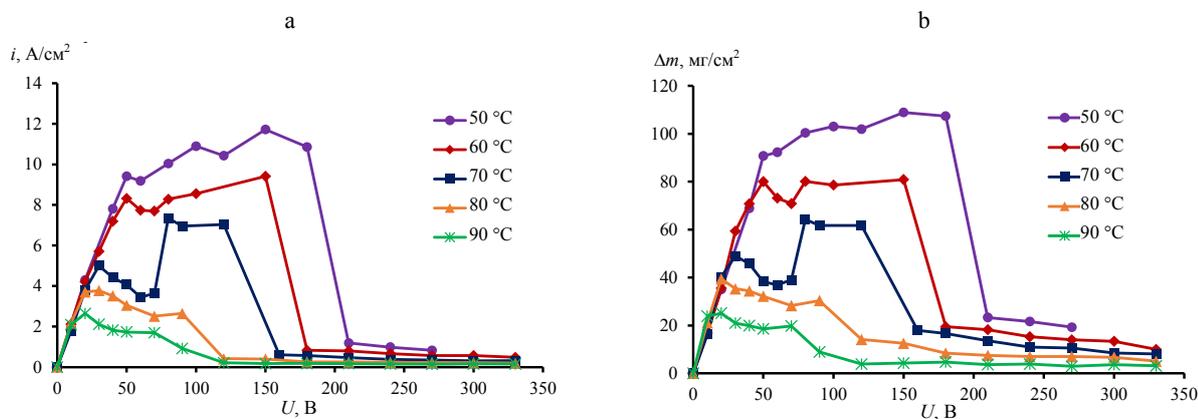


Рис. 3. Влияние напряжения на плотность тока (а) и съем металла (б)
 Fig. 3. Effect of voltage on current density (a) and metal removal (b)

В области существования стабильного электролитно-плазменного режима напряжение не оказывает существенного влияния на плотность тока и съём металла. Например, при температуре 90 °С изменение напряжения от 120 до 330 В приводит к снижению съёма металла с 4,3 до 3,1 мг/см². Более значимым параметром обработки при этом является температура электролита. При температуре 80 °С съём металла в области электролитно-плазменного режима повышается до 5,1–12,6 мг/см², а при температуре 70 °С – до 8,1–16,6 мг/см². Однако наибольший съём металла отмечается на границе электрохимического и коммутационного режимов, а также в области коммутационного режима. В зависимости от температуры электролита максимальный съём при этом превышает значения, соответствующие электролитно-плазменному режиму, в 6–8 раз.

В пределах электрохимического режима при достижении критического значения напряжения происходит снижение плотности тока и съёма металла. Такой эффект наблюдается во всем исследованном диапазоне температур, однако на представленных зависимостях наиболее отчетливо проявляется при значениях 60 и 70 °С – за снижением плотности тока и съёма металла следует рост их значений из-за возникновения коммутационного режима. Снижение плотности тока и съёма металла связано с повышением сопротивления прианодной зоны из-за образующейся на аноде в результате электролиза газовой смеси.

На основании результатов расчета по формуле (2) построена диаграмма, характеризующая влияние напряжения на коэффициент вы-

хода металла по току η при различных значениях температуры электролита (рис. 4). На диаграмме отображены данные только для тех значений напряжения, при которых во всей исследуемой области температур электролита действует один и тот же анодный режим. Такие условия выполняются в диапазоне: 10–70 В – в электрохимическом режиме; 90 В – в коммутационном; 210–330 В – в электролитно-плазменном режиме. Из диаграммы исключены данные о коэффициенте η , полученные при температуре 50 °С для значений напряжения 300 и 330 В, поскольку при этих параметрах происходил переход электролитно-плазменного процесса в режим нагрева, характеризуемый относительно малым съёмом металла.

Из диаграммы видно, что в диапазоне, соответствующем электролитно-плазменному режиму, коэффициент η существенно выше, чем при значениях напряжения, соответствующих электрохимическому и коммутационному режимам. Причем, несмотря на то что коммутационный режим характеризуется периодическим кратковременным образованием парогазовой оболочки, то есть частичным переходом в электролитно-плазменный режим, установленные для него значения коэффициента η (при напряжении 90 В) не превышают значений, полученных для электрохимического режима (10–70 В). Так, в электрохимическом режиме значения η находятся в диапазоне 0,16–0,24, в коммутационном – в диапазоне 0,18–0,24, а в электролитно-плазменном режиме при напряжении от 210 В до 330 В коэффициент η увеличивается до 0,40–0,62.

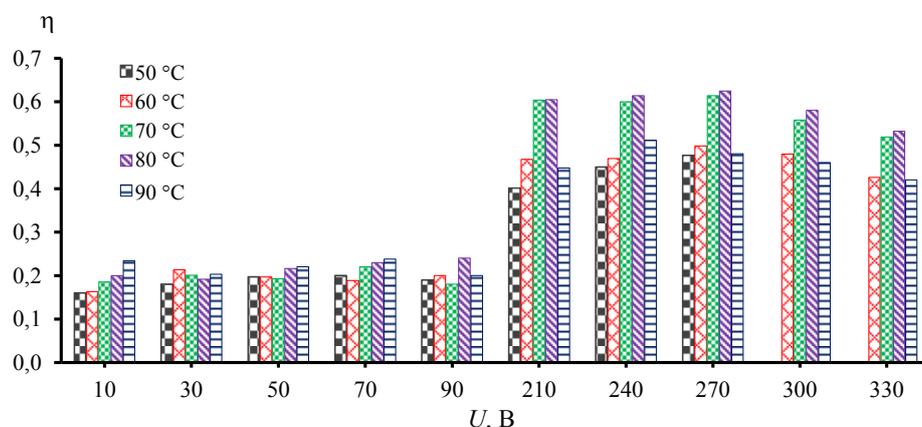


Рис. 4. Зависимость коэффициента выхода металла по току от напряжения

Fig. 4. Dependence of metal current efficiency on voltage

Низкие значения коэффициента η , полученные в области напряжений от 10 до 90 В, связаны с применением неэффективного для электрохимического процесса электролита, состав и свойства которого (прежде всего электропроводность) не позволяют обеспечить оптимальные условия для его реализации. При этом для процессов электрохимической обработки различных материалов коэффициент η может достигать 0,995. Например, при размерной электрохимической обработке стали AISI 321 с использованием в качестве электролита раствора хлорида натрия концентрацией 25 % значение коэффициента η составляет 0,61 [11].

В электролитно-плазменном режиме (210–330 В) отчетливо проявляется экстремальная зависимость коэффициента η от температуры электролита с максимумом в области 70–80 °С. При температуре 70 °С значения коэффициента η несколько меньше, чем при 80 °С. Минимальные значения коэффициента выхода по току η получены при температуре электролита 50 °С. В зависимости от напряжения они изменяются от 0,40 при 210 В до 0,47 при 270 В.

В диапазоне напряжений от 210 до 270 В при температуре 70 и 80 °С не происходит существенного изменения коэффициента η – его величина составляет 0,60–0,61 и 0,60–0,62 соответственно. Однако дальнейшее повышение напряжения приводит к снижению η . Причем такая тенденция наблюдается для всех исследованных значений температуры. Например, повышение напряжения при температуре 80 °С приводит к снижению коэффициента η до 0,58 при 300 В и до 0,53 при 330 В.

Следует отметить, что при температуре электролита 90 °С, наиболее соответствующей диапазону, при котором реализуются производственные процессы ЭПО коррозионностойких сталей, коэффициент η принимает относительно низкие значения: 0,46 – при 300 В; 0,42 – при 300 В. Таким образом, хотя эти режимы и обеспечивают минимальную плотность тока и соответственно возможность одновременной обработки большей площади, а также более высокую стабильность парогазовой оболочки, что особенно актуально при обработке изделий сложной формы, они характер-

ризуются относительно невысокой эффективностью за счет низкого коэффициента выхода по току.

На рис. 5 представлены зависимости удельной энергии, расходуемой на съем единицы массы $q/\Delta m$, от напряжения. В электрохимическом режиме полученные зависимости имеют положительный, близкий к линейному, характер, причем температура электролита не влияет на величину параметра $q/\Delta m$. Так, при напряжении 70 В разброс значений $q/\Delta m$, полученных при различной температуре, находится в диапазоне 0,23–0,29 Вт·ч/(см²·мг). При температуре электролита 50, 60 и 70 °С линейный рост параметра $q/\Delta m$ сохраняется и в коммутационном режиме (участки зависимостей, соответствующие коммутационному режиму, отмечены прерывистой линией), а при приближении к границе электролитно-плазменного участка происходит его резкое снижение. При температуре электролита 80 и 90 °С в коммутационном режиме наблюдается только снижение параметра $q/\Delta m$. В электролитно-плазменном режиме по мере увеличения напряжения также происходит рост параметра $q/\Delta m$ по зависимости, близкой к линейной. Причем его минимальные значения обеспечиваются при температуре электролита 70 и 80 °С, что подтверждает относительно невысокую эффективность обработки при температуре 90 °С.

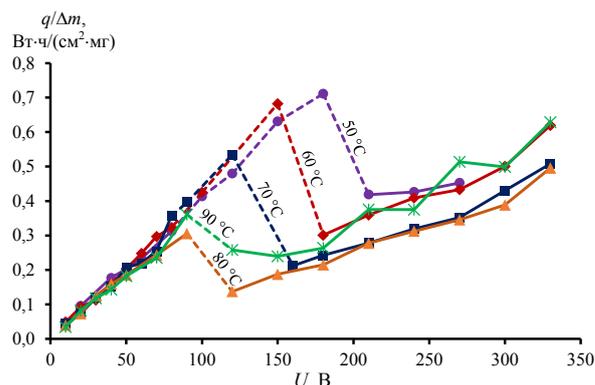


Рис. 5. Влияние напряжения на удельную энергию, расходуемую на съем единицы массы металла

Fig. 5. Effect of voltage on the specific energy consumed to remove a unit of mass of metal

Несмотря на высокие значения коэффициента выхода по току, электролитно-плазменный режим характеризуется большими энерго-

затратами на единицу массы удаленного металла по сравнению с электрохимическим режимом. Так, при температуре 80 °С в электрохимическом режиме в диапазоне напряжения 10–70 В параметр $q/\Delta m$ принимает значения 0,04–0,31 Вт·ч/(см²·мг), а в электролитно-плазменном режиме (120–330 В) – 0,14–0,50 Вт·ч/(см²·мг). При температуре 90 °С в электролитно-плазменном режиме значение параметра $q/\Delta m$ изменяется от 0,26 до 0,63 Вт·ч/(см²·мг).

На рис. 6 представлены фотографии, характеризующие состояние поверхности образцов после обработки в различных анодных режимах при температуре электролита 80 °С. На исходной поверхности присутствуют задиры и складки, образованные при волочении проволоки, использованной для изготовления

образцов (рис. 6а). В результате обработки в электрохимическом режиме при напряжении 20 В формируется поверхность с развитым рельефом, на котором проявляются границы отдельных зерен (рис. 6б). После обработки в коммутационном режиме (90 В) формируется глянцевая поверхность, которая, однако, имеет пористую структуру с преимущественным размером пор 2–4 мкм. При этом поры имеют высокую плотность распределения – их площадь занимает 28,8 % от площади всей поверхности (рис. 6с). Обработка в электролитно-плазменном режиме при напряжении 300 В обеспечивает сглаживание поверхности и удаление задиры. На поверхности проявляются только дефекты в виде впадин складок и продольных канавок, образованных при волочении (рис. 6д).

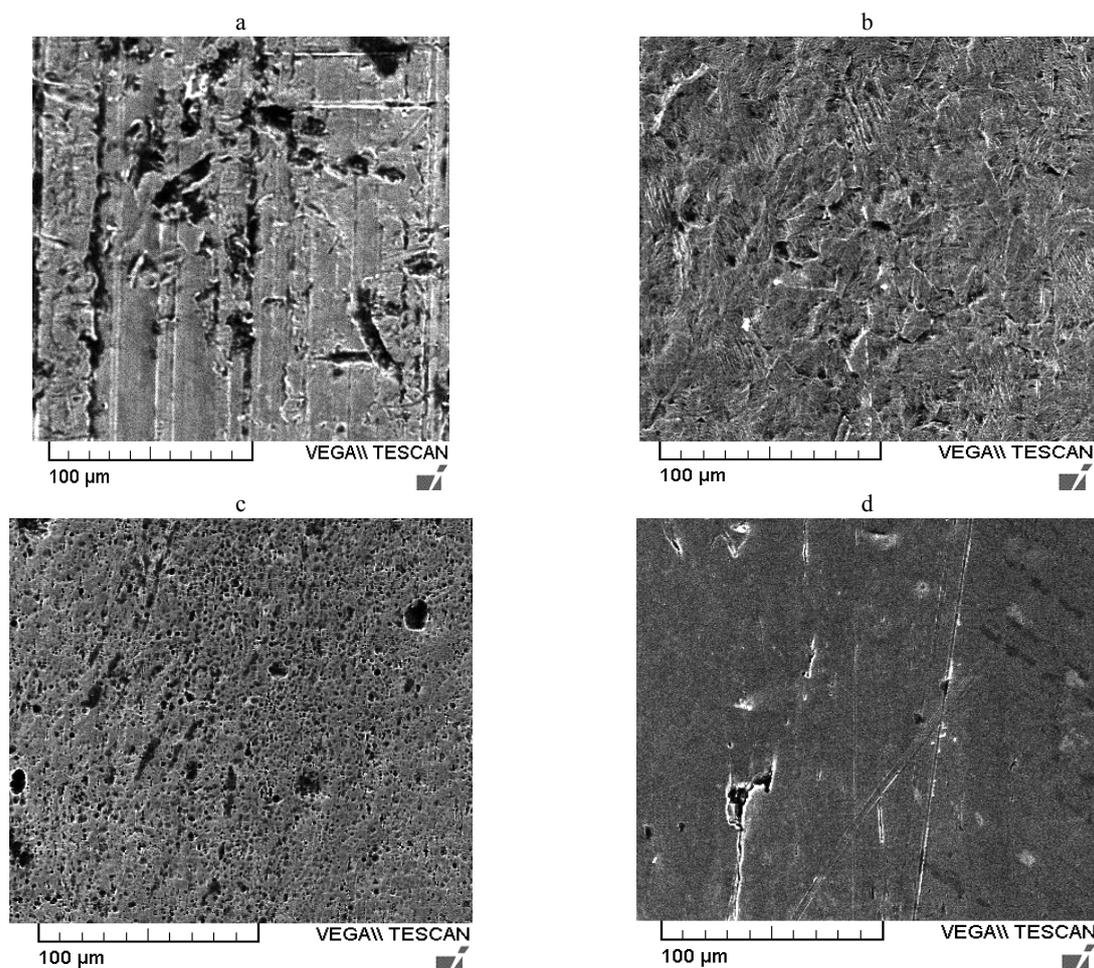


Рис. 6. Состояние поверхности после обработки в различных анодных режимах: а – исходная поверхность; б – электрохимический режим; с – коммутационный режим; д – электролитно-плазменный режим

Fig. 6. Surface condition after treatment in various anodic modes: a – initial surface; b – electrochemical mode; c – switching mode; d – electrolyte-plasma mode

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в процессе анодной обработки в 5%-м растворе сульфата аммония, широко применяемом в практике ЭПО коррозионностойких сталей, наибольший съём металла отмечается на границе электрохимического и коммутационного режимов, а также в области коммутационного режима. В зависимости от температуры электролита максимальный съём при этом превышает значения, соответствующие электролитно-плазменному режиму, в 6–8 раз. В области значений напряжения, соответствующей электролитно-плазменному режиму, коэффициент выхода металла по току η существенно выше, чем при значениях напряжения, соответствующих электрохимическому и коммутационному режимам. В зависимости от температуры электролита значения η находятся в следующих диапазонах: в электролитно-плазменном режиме – 0,40–0,62; в коммутационном – 0,18–0,24; в электрохимическом – 0,16–0,24.

2. В электролитно-плазменном режиме (210–330 В) максимум коэффициента η обеспечивается в области температуры электролита 70–80 °С. При этом в диапазоне напряжений от 210 до 270 В не происходит существенного изменения η – его величина составляет 0,60–0,62 соответственно. Однако дальнейшее повышение напряжения приводит к снижению коэффициента η . Так, повышение напряжения при температуре 80 °С приводит к снижению коэффициента η до 0,58 при 300 В и до 0,53 при 330 В.

3. Электролитно-плазменный режим характеризуется большими энергозатратами на единицу массы удаленного металла ($q/\Delta t$) по сравнению с электрохимическим режимом. Так, при температуре 80 °С в электрохимическом режиме в диапазоне напряжения 10–70 В параметр $q/\Delta t$ принимает значения 0,04–0,31 Вт·ч/(см²·мг), а в электролитно-плазменном режиме (120–330 В) – 0,14–0,50 Вт·ч/(см²·мг). При температуре 90 °С в электролитно-плазменном режиме значение параметра $q/\Delta t$ изменяется от 0,26 до 0,63 Вт·ч/(см²·мг). Поэтому совмещение

этих режимов в одном анодном процессе позволяет использовать преимущества каждого из них: интенсивный съём металла при низких энергозатратах в электрохимическом режиме и полирование с достижением высокого качества поверхности в электролитно-плазменном режиме. За счет такого комплексного электролитно-плазменного и электрохимического воздействия становится возможным создание эффективных процессов повышения качества поверхности и размерной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Surface Finish Machining of Medical Parts Using Plasma Electrolytic Polishing / H. Zeidler, F. Boettger-Hiller, J. Edelmann, A. Schubert // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 49. P. 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>.
2. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // 14 International Scientific Conference “CO-MAT-TECH-2006”, Slovakia, Trnava, 19–20 October 2006. P. 6.
3. Electrolytic Plasma Polishing of NiTi Alloy / A. Korolyov, A. Bubulis, J. Věžys [et al.] // *Mathematical Models In Engineering*. 2021. Vol. 7, iss. 4. P. 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
4. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, А. Э. Паршутто, В. С. Нисс // *Наука и техника*. 2012. № 3. С. 3–6.
5. Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte / Y. Aliakseyeu, A. Bubulis, A. Korolyov [et al.] // *Mechanika*. 2021. Vol. 27, No 1, P. 88–93. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
6. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс, А. Э. Паршутто // *Наука и техника*. 2016. № 1. С. 61–68.
7. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Вашенко, А. Я. Каменев. Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с.
8. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, А. Э. Паршутто, В. С. Нисс // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
9. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах / А. Ю. Королёв, Ю. Г. Алексеев, В. С. Нисс, А. Э. Паршутто // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>.

10. Королев, А. Ю. Энергетические характеристики стадии формирования парогазовой оболочки при электролитно-плазменной обработке / А. Ю. Королев, В. А. Томило, В. С. Нисс // Докл. Над. акад. наук Беларуси. 2024. Т. 68, № 4. С. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>.
11. Амитан, Г. Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон [и др.]; под. общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. 719 с.

Поступила 30.10.2024

Подписана в печать 14.01.2025

Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Zeidler H., Boettger-Hiller F., Edelmann J., Schubert A. (2016) Surface Finish Machining of Medical Parts Using Plasma Electrolytic Polishing. *Procedia CIRP*, 49, 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>.
2. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. (2006) Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *14 International Scientific Conference "CO-MAT-TECH-2006", Slovakia, Trnava, 19–20 October 2006*, 6.
3. Korolyov A., Bubulis A., Vėžys J., Aliakseyeu Y., Minchenya V., Niss V., Markin D. (2021). Electrolytic Plasma Polishing of NiTi Alloy. *Mathematical Models in Engineering*, 7 (4), 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
4. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuta A. E., Niss V. S. (2012) Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
5. Aliakseyeu Y., Bubulis A., Korolyov A., Niss V., Kandrotaitė Janutienė R. (2021). Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte. *Mechanics*, 27 (1), 88–93. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
6. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 15 (1), 61–68 (in Russian).
7. Kulikov I. S., Vashchenko S. V., Kamenev A. Ya. (2010) *Electrolyte-Plasma Processing of Materials*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 232 (in Russian).
8. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuto A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Mode in a High-Gradient Electric Field. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (5), 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399> (in Russian).
9. Korolyov A. Yu., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S., Parshuto A. E. (2021) Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 20 (4), 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286> (in Russian).
10. Korolyov A. Yu., Tomilo V. A., Niss V. S. (2024) Energy Characteristics of the Vapor-Gas Shell Formation Stage During Electrolyte-Plasma Treatment. *Doklady Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 68 (4), pp. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352> (in Russian).
11. Amitan G. L., Baisupov I. A., Baron Yu. M. (1988) *Handbook of Electrochemical and Electrophysical Processing Methods*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch. 719 (in Russian).

Received: 30.10.2024

Accepted: 14.01.2025

Published online: 31.03.2025

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО
ТВЕРДОГО ТЕЛА
DEFORMATION
IN SOLID MECHANICS

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-118-123>

УДК 539.3

Применение балочных функций для статического расчета изгибаемых стержней и прямоугольных плит

Докт. техн. наук, проф. С. В. Босаков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В представленной работе прогибы стержня и прямоугольной плиты с любыми типами граничных условий предлагается представлять в виде ряда и двойного ряда по собственным функциям дифференциального уравнения изгибных колебаний балки или плиты с соответствующими граничными условиями. Далее по методу Ритца определяется функционал полной энергии изгиба стержня и изгиба и кручения плиты и действующей на них внешней нагрузки. Для стержня с любыми типами граничных условий дифференцированием функционала полной энергии получено точное решение для прогибов в виде быстро сходящегося ряда. При этом использованы ранее опубликованные результаты С. П. Тимошенко и Е. С. Сорокина. Для прямоугольной плиты, используя свойство ортогональности собственных функций и их вторых производных, вычисляется квадратичный функционал от неопределенных коэффициентов при собственных функциях. Дифференцированием функционала по каждому из неизвестных коэффициентов образуется бесконечная система линейных алгебраических уравнений, решение которой способом усечения, позволяет найти прогибы плиты. Далее известными методами теории изгибаемых пластинок находятся усилия в плите. Приведены два примера расчета прямоугольной плиты с четырьмя опертыми гранями и плиты с двумя опертыми гранями. Предлагаемый подход прост, универсален и позволяет рассчитывать прямоугольные плиты с любыми типами граничных условий на контуре на произвольную внешнюю нагрузку. В статье приведена таблица собственных чисел и форм для расчета прямоугольных плит.

Ключевые слова: стержень, прямоугольная плита, метод Ритца, собственные числа, собственные функции

Для цитирования: Босаков, С. В. Применение балочных функций для статического расчета изгибаемых стержней и прямоугольных плит / С. В. Босаков // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 118–123. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-118-123>

Application of Beam Functions for Static Calculation of Bending Rods and Rectangular Plates

S. V. Bosakov

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In this paper, the deflections of a rod and a rectangular plate with any types of boundary conditions are proposed to be represented as a series and a double series of eigenfunctions of the differential equation of bending vibrations of a beam or plate with the corresponding boundary conditions. Then, using the Ritz method, the functional of the total energy of rod bending and bending and torsion of the plate and the external load acting on them is determined. For a rod with any types of boundary conditions, by differentiating the functional of the total energy, an exact solution for deflections in the form of a rapidly converging series is obtained. In this case, previously published results by S.P. Timoshenko and E.S. Sorokina are used. For a rectangular plate, using the orthogonality property of eigenfunctions and their second derivatives, a quadratic functional of the indefinite coefficients at the eigenfunctions is calculated. Differentiating the functional with respect to each of the unknown coefficients forms an infinite system of linear algebraic equations, the solution of which by the truncation method allows us to find the deflections of the plate. Further, the forces in the plate are found using known methods. Two examples of calculating a rectangular plate with four supported edges and a plate with two supported edges are given. The proposed

Адрес для переписки

Босаков Сергей Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-04
vm3_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Bosakov Siarhei V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-04
vm3_ftk@bntu.by

approach is simple, universal and allows calculating rectangular plates with any types of boundary conditions on the contour for an arbitrary external load. The article provides a table of eigenvalues and forms for calculating rectangular plates.

Keywords: rod, rectangular slab, Ritz method, eigenvalues, eigenfunctions

For citation: Bosakov S. V. (2025) Application of Beam Functions for Static Calculation of Bending Rods and Rectangular Plates / *Science and Technique*. 24 (2), 118–123. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-118-123> (in Russian)

Введение

Под балочными функциями в работе будем понимать собственные функции дифференциального уравнения изгибных колебаний стержня с непрерывно распределенной массой. Такие функции для различно опертых балок построены в работах С. П. Тимошенко [1], В. Н. Фаддеевой [2]. Автором они собраны в табл. 1, где также приводятся уравнения для определения собственных чисел и величины первых трех собственных чисел и уравнения для определения последующих. Ранее таблицы численных значений этих функций и интегралов от них приведены в монографии Е. С. Сорокина [3] и позднее у И. М. Бабакова [4] даны таблицы для определения частот собственных колебаний различно опертых прямоугольных плит.

Эту же задачу решали авторы [5, 6]. Балочные функции и четные производные от них ортогональны и полезны при решении задач статики, динамики и устойчивости различно опертых стержней и балок.

Основная часть

1. Рассмотрим изгибаемый стержень с любыми граничными условиями.

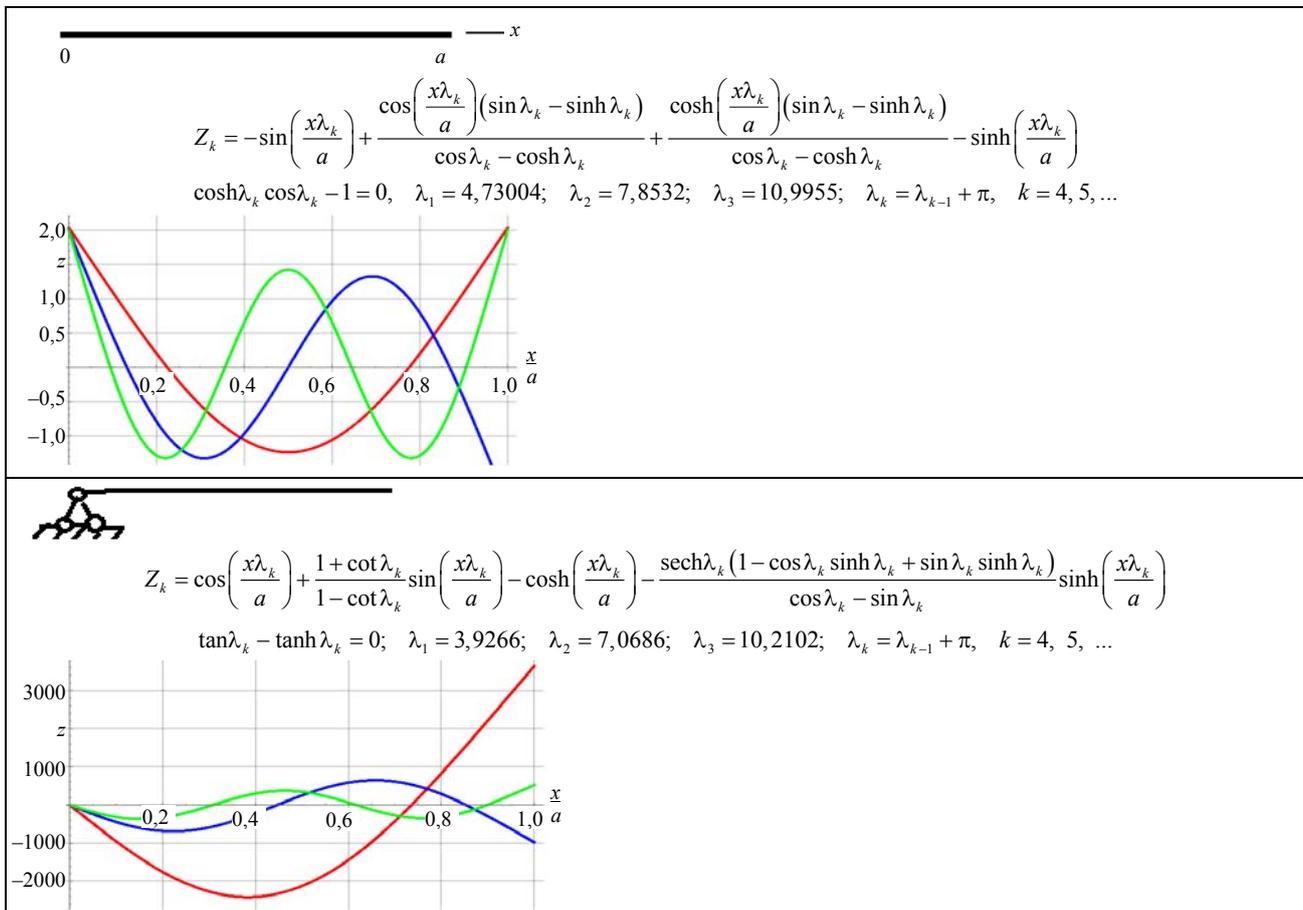
Энергия деформаций изгиба выражается известной формулой [1]

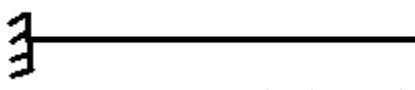
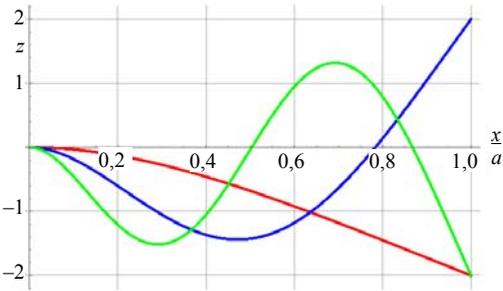
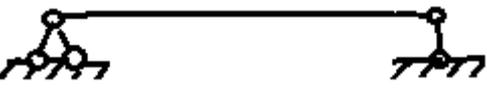
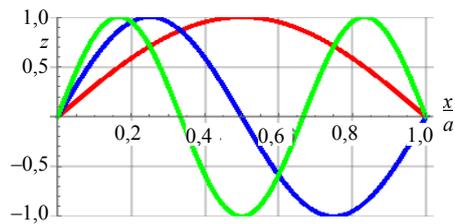
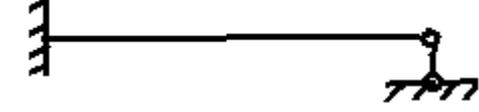
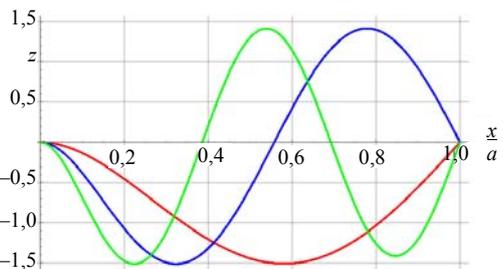
$$U = \frac{EJ}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 Y}{dx^2} \right)^2 dx, \tag{1}$$

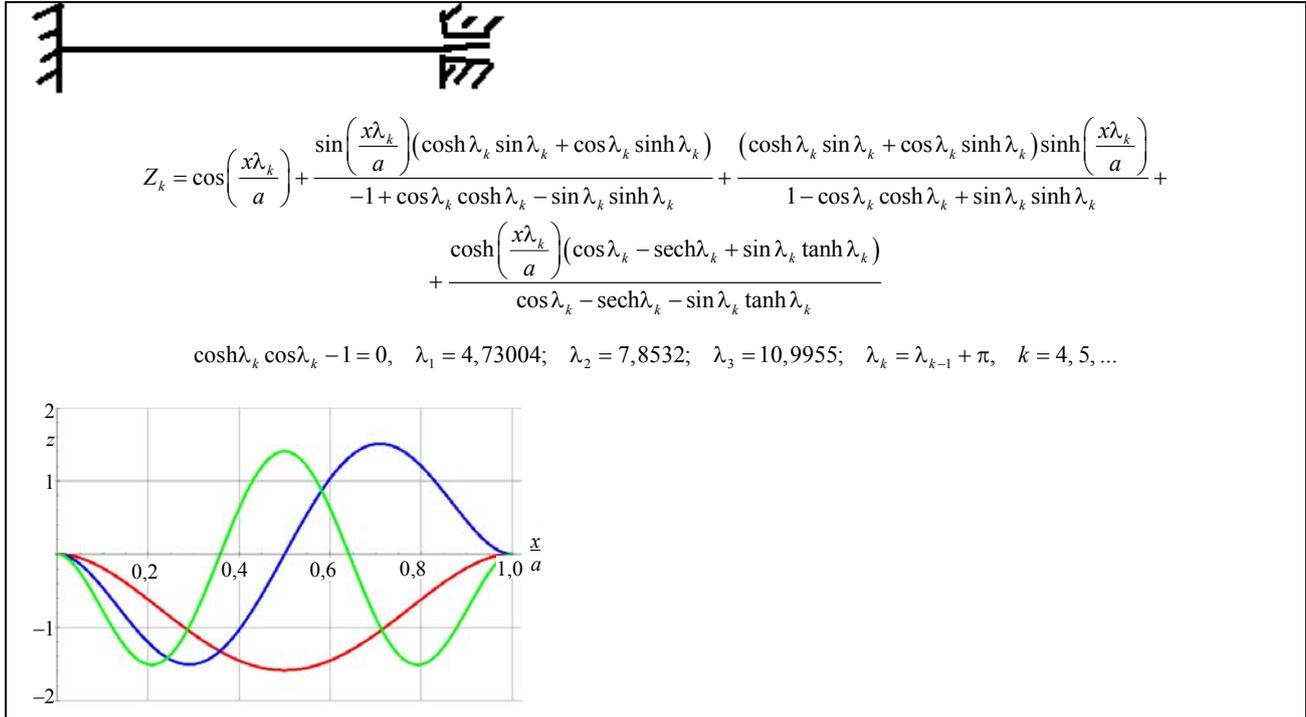
где EJ, l – изгибная жесткость и длина стержня; Y – прогибы стержня.

Таблица 1

Балочные функции
Beam functions



 $Z_k = \cos\left(\frac{x\lambda_k}{a}\right) - \cosh\left(\frac{x\lambda_k}{a}\right) - \frac{\cos\lambda_k + \cosh\lambda_k}{\sin\lambda_k + \sinh\lambda_k} \sin\left(\frac{x\lambda_k}{a}\right) + \frac{\cos\lambda_k + \cosh\lambda_k}{\sin\lambda_k + \sinh\lambda_k} \sinh\left(\frac{x\lambda_k}{a}\right)$ <p>$1 + \cos\lambda_k \cosh\lambda_k = 0; \lambda_1 = 1,8751; \lambda_2 = 4,6941; \lambda_3 = 7,8648; \lambda_k = \lambda_{k-1} + \pi, k = 4, 5, \dots$</p> 
 $Z_k = \sin\left(k \frac{\pi x}{a}\right), \quad k = 1, 2, \dots$ 
 $Z_k = \cos\left(\frac{x\lambda_k}{a}\right) - \cosh\left(\frac{x\lambda_k}{a}\right) - \frac{(\cos\lambda_k - \cosh\lambda_k) \sin\left(\frac{x\lambda_k}{a}\right)}{\sin\lambda_k - \sinh\lambda_k} + \frac{(\cos\lambda_k - \cosh\lambda_k) \sinh\left(\frac{x\lambda_k}{a}\right)}{\sin\lambda_k - \sinh\lambda_k}$ <p>$\tan\lambda_k - \tanh\lambda_k = 0; \lambda_1 = 3,9266; \lambda_2 = 7,0686; \lambda_3 = 10,2102; \lambda_k = \lambda_{k-1} + \pi, k = 4, 5, \dots$</p> 



Представим

$$Y = \sum_{k=1}^{\infty} A_k y_k \left(\lambda_k \frac{x}{\ell} \right), \quad \frac{d^4 y_k}{dx^4} - \frac{\lambda_k^4}{\ell^4} y_k = 0. \tag{2}$$

Здесь λ_k, y_k, A_k – собственные числа, собственные функции и неизвестные постоянные коэффициенты.

Подставим (2) в (1) и выполним интегрирование с учетом [1, 3]:

$$\int_0^{\ell} y_i \left(\lambda_i \frac{x}{\ell} \right) y_k \left(\lambda_k \frac{x}{\ell} \right) dx = 0, \quad i \neq k;$$

$$= \left(\frac{\ell}{4} y_i^2(\ell) - \frac{\ell^5}{2\lambda_i^4} y_i'(\ell) y_i'''(\ell) + \frac{\ell^5}{4\lambda_i^4} y_i''^2(\ell) \right), \quad i = k; \tag{3}$$

$$\int_0^{\ell} y_i''^2 \left(\lambda_i \frac{x}{\ell} \right) dx = \frac{\lambda_i^4}{\ell^4} \int_0^{\ell} y_i^2 \left(\lambda_i \frac{x}{\ell} \right) dx.$$

При действии на стержень сосредоточенной силы P в точке xp составим функционал полной энергии деформаций изгиба и действующей на стержень нагрузки при выполнении (2). Продифференцировав полученное выражение по A_k и приравняв полученное выражение нулю, получим формулу для A_k при любых граничных условиях на концах стержня

$$A_k = \frac{4P\ell^3}{EJ} \frac{y_k \left(\lambda_k \frac{xp}{\ell} \right)}{\left(\lambda_k^4 y_k^2(\ell) - 2\ell^4 y_k'(\ell) y_k'''(\ell) + \ell^4 y_k''^2(\ell) \right)}. \tag{4}$$

Для шарнирно опертого стержня:

$$\lambda_k = k\pi; \quad y_k = \sin\left(k\pi \frac{x}{\ell}\right); \quad y_k(\ell) = y_k'(\ell) = 0;$$

$$y_i'(\ell) y_i'''(\ell) = -\left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^4 \cos^2(k\pi).$$

Если $xp = \frac{\ell}{2}$, то

$$Y = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin\left(k\pi \frac{x}{\ell}\right) = \frac{2P\ell^3}{\pi^4 EJ} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{k\pi x}{\ell}}{k^4} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right).$$

Для максимального прогиба получим с уче-

$$\text{том } \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{k\pi}{2}}{k^4} = \frac{\pi^4}{96}$$

$$Y_{\max} = \frac{P\ell^3}{48EJ}.$$

Таким образом, получено выражение функции Грина в форме бесконечного ряда для балки с любыми типами граничных условий. Это выражение позволяет решать разнообразные задачи статики при любом нагружении балок.

2. Рассмотрим вопрос применения балочных функций к расчету прямоугольных изгибаемых плит с использованием метода Ритца [7]. Сразу отметим, если плита по четырем сторонам опирается, то энергия деформаций изгиба и кручения плиты выражается в следующем виде [4, 8]:

$$\Phi = \frac{D}{2} \iint_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 dx dy, \quad (5)$$

где $W(x, y)$ – прогибы плиты; D – ее цилиндрическая жесткость.

Если некоторые грани плиты не опираются, то для энергии деформаций необходимо использовать полное выражение

$$\Phi = \frac{D}{2} \left\{ \iint_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy, \quad (6)$$

ν – коэффициент Пуассона материала плиты.

Рассмотрим прямоугольную плиту, две грани которой защемлены, две шарнирно оперты (рис. 1). Плита загружена равномерно распределенной нагрузкой. Принимаем прогибы в виде суммы произведений двух функций из табл. 1 для балки с защемленным и шарнирно опертыми концами:

$$W = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{m,n} U_m \left(\lambda_m \frac{x}{a} \right) V_n \left(\mu_n \frac{y}{b} \right), \quad (7)$$

$$\frac{d^4 U_m}{dx^4} - \lambda_m^4 U_m = 0; \quad \frac{d^4 V_n}{dy^4} - \mu_n^4 V_n = 0.$$

Используя (5), находим полную потенциальную энергию плиты и действующей на нее нагрузки как квадратичную функцию коэффи-

циентов $A_{m,n}$. Система линейных алгебраических уравнений для определения $A_{m,n}$ получается дифференцированием полной энергии по каждому из коэффициентов $A_{m,n}$ и приравниванием полученного выражения нулю.

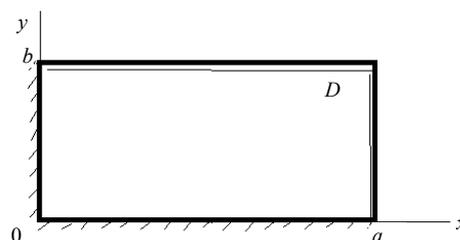


Рис. 1. Прямоугольная плита под действием равномерно распределенной нагрузки

Fig. 1. Rectangular plate under uniformly distributed load

Для плиты с $a = 6$ м; $b = 4$ м; $D = 21000$ кНм; $q = 10$ кН/м² способом усечения [9] с учетом первых четырех членов ряда (7) получено:

$$A_{1,1} = \frac{0,41439q}{D}; \quad A_{1,2} = \frac{0,01989q}{D};$$

$$A_{2,1} = -\frac{0,02367q}{D}; \quad A_{2,2} = \frac{0,00277q}{D}.$$

На рис. 2 приведена поверхность прогибов рассматриваемой плиты (м).

Теперь рассмотрим прямоугольную плиту, одна грань которой жестко защемлена, другая шарнирно оперта, остальные не опираются. На плиту действует угловая сосредоточенная сила (рис. 3). Представим прогибы плиты в виде (7), где балочные функции выберем из табл. 1 для консольной балки и балки с шарнирной опорой. Для плиты с характеристиками предыдущего примера и $P = 40$ кН с учетом первых четырех членов ряда (7) после промежуточных вычислений получено:

$$A_{1,1} = 2,12410 \cdot 10^{-8} P; \quad A_{1,2} = -3,13033 \cdot 10^{-12} P;$$

$$A_{2,1} = -1,07439 \cdot 10^{-8} P; \quad A_{2,2} = 2,97864 \cdot 10^{-12} P.$$

На рис. 4 приведена поверхность прогибов плиты. По функциям прогибов по известным формулам находятся внутренние усилия в плите [3].

Отметим, что в этом примере на неопертых краях плиты неточно выполняются статические граничные условия для каждого члена ряда (7). Однако известно [8], что при использовании метода Ритца они выполняются при взятии достаточно большого числа членов ряда (7).

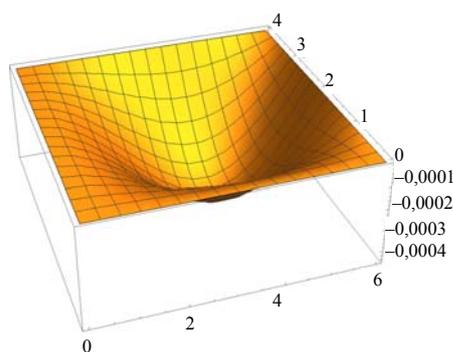


Рис. 2. Поверхность прогибов плиты

Fig. 2. Surface of slab deflections

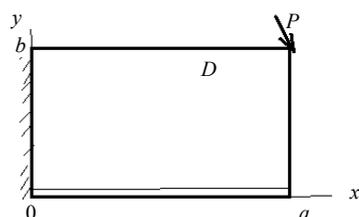


Рис. 3. Прямоугольная плита, нагруженная угловой силой

Fig. 3. Rectangular plate loaded with angular force

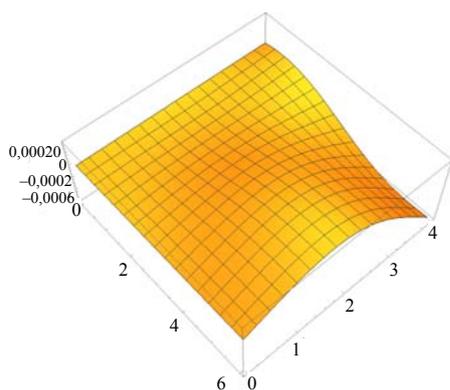


Рис. 4. Поверхность прогибов в прямоугольной плите с двумя опорными краями

Fig. 4. Surface of deflections in a rectangular plate with two supported edges

ВЫВОДЫ

1. К настоящему времени известны точные решения Навье и Леви для статического расчета изгибаемых плит в форме тригонометрических и гипербола-тригонометрических рядов [7] для шарнирно опертой по четырем граням и шарнирно опертой по двум противоположным граням и различно опертой по двум остальным. В монографии [10] изложен подход В. Новацкого, в котором задача расчета прямоугольной плиты с различными опертыми гранями сложным образом сводится к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений.

2. Предлагаемое в работе решение универсальное, проще и быстрее позволяет получить прогибы прямоугольной плиты с любыми граничными условиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. М.: Физматгиз, 1959. 439 с.
2. Фаддеева, В. Н. О фундаментальных функциях оператора X^{IV} / В. Н. Фаддеева // Труды Математического института АН СССР. 1949. Т. 28. С. 157–159.
3. Сорокин, Е. С. Динамика междуэтажных перекрытий / Е. С. Сорокин. М.–Л.: Стройиздат, Наркомстрой, 1941. 240 с.
4. Бабаков, И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. М.: Наука, 1965. 559 с.
5. Галеркин, Б. Г. Упругие тонкие плиты / Б. Г. Галеркин. М.: Госстройиздат, 1933. 371 с.
6. Wu, J. H. Exact Solutions for Free-Vibration Analysis of Rectangular Plates Using Bessel Functions / Jiu Hui Wu, A. Q. Liu, H. L. Chen // Journal of Applied Mechanics. 2007. Vol. 74. P. 1247–1251. <https://doi.org/10.1115/1.2744043>.
7. Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности / А. В. Александров, В. Д. Потапов. М.: Высш. шк., 1990. 400 с.
8. Михлин, С. Г. Прямые методы в математической физике / С. Г. Михлин. М.–Л.: Гостехтеориздат, 1950. 429 с.
9. Канторович, Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. М.–Л.: Физматгиз, 1962. 701 с.
10. Кончковский, З. Плиты: статические расчеты / З. Кончковский. М.: Стройиздат, 1980. 480 с.

Поступила 04.11.2024

Подписана в печать 21.01.2025

Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Timoshenko S. P. (1959) *Oscillations in Engineering*. Moscow, Fizmatgiz Publ. 439 (in Russian).
2. Faddeeva V. N. (1949) On the fundamental functions of the operator X^{IV} . *Proceedings of the Mathematical Institute of the USSR Academy of Sciences*, 28, 157–159 (in Russian).
3. Sorokin E. S. (1941) *Dynamics of Interfloor Ceilings*. Moscow-Leningrad, Publishing Houses “Stroyizdat”, “Narkomstroy”. 240 (in Russian).
4. Babakov I. M. (1965) *Theory of Oscillations*. Moscow, Nauka Publ. 559 p.
5. Galerkin B. G. (1933) *Elastic Thin Plates*. Moscow, Gosstroyzdat Publ. 371 (in Russian).
6. Wu J. H., Liu A. Q., Chen H. L. (2005) Exact Solutions for Free-Vibration Analysis of Rectangular Plates Using Bessel Functions. *Journal of Applied Mechanics*, 74 (6), 1247–1251. <https://doi.org/10.1115/1.2744043>.
7. Aleksandrov A. V., Potapov V. D. (1990) *Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
8. Mikhlin S. G. (1950) *Direct Methods in Mathematical Physics*. Moscow-Leningrad, Gostekhteorizdat Publ. 429 (in Russian).
9. Kantorovich L. V., Krylov V. I. (1962) *Approximate Methods of Higher Analysis*. Moscow-Leningrad, Fizmatgiz Publ. 701 (in Russian).
10. Konchkovsky Z. (1980) *Plates. Static Calculations*. Moscow, Stroyizdat Publ. 480 (in Russian).

Received: 04.11.2024

Accepted: 21.01.2025

Published online: 31.03.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-124-133>

УДК 669.018

Напряжения в композитной строительной арматуре, обусловленные различиями коэффициентов Пуассона

Докт. техн. наук, доц. В. Г. Барсуков¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты А. Г. Лежава¹⁾, Е. А. Евсева²⁾

¹⁾Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (Гродно, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Цель работы – расчетная оценка напряжений в элементах композитной строительной арматуры, обусловленных различиями коэффициентов Пуассона армирующих волокон и полимерного связующего. Методика исследований основана на разработке микромеханической модели межфазного взаимодействия армирующего волокна и полимерной матрицы в элементарной ячейке, представляющей собой полый полимерный микроцилиндр, в котором в виде соединения с изменяющимся под нагрузкой деформационным натягом расположен волокнистый армирующий наполнитель. Произведена трансформация задачи Ляме к расчетной оценке влияния различий в значениях коэффициентов Пуассона армирующих волокон и полимерной матрицы, а также растягивающих номинальных напряжений и объемного содержания волокон в композитной арматуре на изменение локальных напряжений в армирующих волокнах и полимерной матрице. Получены аналитические зависимости, связывающие параметры локального напряженно-деформированного состояния стенок элементарного цилиндра в окрестностях волокнистого наполнителя с комплексом показателей физико-механических свойств материалов полимерной матрицы и волокнистого наполнителя (модули упругости и коэффициенты Пуассона), а также объемным содержанием наполнителя. В качестве примера произведен расчет этих параметров для широкого диапазона степеней наполнения стеклянным и базальтовым волокном ряда полимерных матриц (эпоксидная и полиэфирная). Показано, что в диапазоне объемного содержания наполнителя 0,5–0,7 контактные давления на границе раздела армирующих волокон с полимерной матрицей составляют от 2 до 6 % от номинальных напряжений растяжения в полимерной матрице в зависимости от сочетания коэффициентов Пуассона волокон и матрицы. При этом окружные растягивающие напряжения в полимерной матрице на границе раздела с волокном составляют от 11,6 до 19,2 % от номинальных осевых напряжений растяжения в полимерной матрице для стеклопластиковой и от 10,6 до 17,1 % – для базальтопластиковой арматуры. Результаты исследований могут быть использованы в научно-исследовательской и учебной деятельности.

Ключевые слова: композитная строительная арматура, полимер, армирующие волокна, коэффициент Пуассона, контактное давление, локальные напряжения, степень наполнения

Для цитирования: Барсуков, В. Г. Напряжения в композитной строительной арматуре, обусловленные различиями коэффициентов Пуассона / В. Г. Барсуков, А. Г. Лежава, Е. А. Евсева // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 124–133. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-124-133>

Stresses in Composite Building Reinforcement due to Differences in Poisson's Ratios

V. G. Barsukov¹⁾, A. G. Lezhava¹⁾, E. A. Evseeva²⁾

¹⁾Yanka Kupala State University of Grodno (Grodno, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The aim of the work is the calculation assessment of stresses in the elements of composite building reinforcement caused by differences in the Poisson's ratios of reinforcing fibers and polymer binders. The research methodology is based

Адрес для переписки

Евсева Елена Анатольевна
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65/3,
20113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: + 375 17 239-93-04
vm3_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Evseeva Elena A.
Belarusian National Technical University
146a, Nezavisimosty Ave.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: + 375 17 239-93-04
vm3_ftk@bntu.by

on the development of a micromechanical model of the interphase interaction of the reinforcing fiber and a polymer matrix in an elementary cell, which is a hollow polymer micro-cylinder in which a fibrous reinforcing filler is located in the form of a connection with a deformation tension changing under load. The transformation of the Lamé problem to the calculation assessment of the effect of differences in the values of the Poisson's ratios of the reinforcing fibers and the polymer matrix, as well as nominal tensile stresses and the volumetric content of fibers in the composite reinforcement on changes in local stresses in the reinforcing fibers and polymer matrix is made. Analytical dependencies are obtained linking the parameters of the local stress-strain state of the walls of an elementary cylinder in the vicinity of a fibrous filler with a set of indices of the physical and mechanical properties of polymer matrix materials and fibrous filler (moduli of elasticity and Poisson's ratios), as well as the volume content of the filler. As an example, these parameters are calculated for a wide range of degrees of filling with glass and basalt fiber for a number of polymer matrices (epoxy and polyester). It is shown that in the range of the volumetric filler content of 0.5–0.7, contact pressures at the interface of the reinforcing fibers with the polymer matrix are from 2 to 6 % of the nominal tensile stresses in the polymer matrix, depending on the combination of Poisson ratios of the fibers and the matrix. In this case, the circumferential tensile stresses in the polymer matrix at the interface with the fiber are from 11.6 to 19.2 % of the nominal axial tensile stresses in the polymer matrix for fiberglass and from 10.6 to 17.1 % for basalt-plastic reinforcement. The research results can be used in scientific research and educational activities.

Keywords: composite construction reinforcement, polymer, reinforcing fibers, Poisson's ratio, contact pressure, local stresses, degree of filling

For citation: Barsukov V. G., Lezhava A. G., Evseeva E. A. (2025) Stresses in Composite Building Reinforcement due to Differences in Poisson's Ratios // *Science and Technique*. 24 (2), 124–133. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-124-133> (in Russian)

Введение

Накопленный в индустриально развитых странах опыт исследований и разработок свидетельствует о том, что композитная строительная арматура может эффективно использоваться для армирования бетонных конструкций, работающих в условиях контакта с коррозионно-активными средами при строительстве морских и речных набережных тоннелей [4], подземных коммуникаций, автомобильных и железнодорожных дорог [1–3], перронов, а также при производстве фундаментных плит и блоков, армировании кирпичной кладки [3, 5–6]. Вместе с тем многие вопросы механики композитной строительной арматуры остаются недостаточно изученными [7–9]. Необходим анализ, наряду с рабочими напряжениями, возникающими в композитах под нагрузкой, также дополнительных, обусловленных размерными эффектами [10–12], химической или термической усадкой компонентов системы [13] и др. Вследствие различий коэффициентов Пуассона в таких материалах появляются локальные микроконтактные напряжения, влияющие на эксплуатационные характеристики получаемых изделий. Однако этот вопрос разработан в значительно меньшей мере, а опубликованные данные фрагментарны и противоречивы. В работе [14] предложен вариант приближенной расчетной оценки таких напряжений в элементах однонаправленных волокнистых композитов, пока-

завший, что вклад этих дополнительных напряжений мал в сравнении с напряжениями от осевого растяжения и может при технических расчетах не учитываться, особенно при использовании углеродных армирующих волокон. Однако перенос путем обобщения предложенных в [14] расчетных зависимостей на композитную строительную арматуру не представляется эффективным, поскольку существующая методика предсказывает увеличение растягивающих напряжений в полимерной матрице, действующих в тангенциальном направлении, по мере увеличения расстояния от границы раздела матрицы и волокна, в то время как результаты исследований в смежной области – теории термоупругих напряжений в композитах – предсказывают снижение уровня радиальных и тангенциальных напряжений в матрице по мере удаления от границы раздела с волокном [15, 16]. К тому же имеются принципиальные отличия в механизмах разрушения при растяжении стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры от типовых композитов на основе углеродных волокон. Для углепластиков, как правило, разрушение обусловлено потерей прочности волокон, предельные деформации при растяжении которых обычно меньше предельных деформаций связующего, в связи с чем влияние напряжений в связующем на прочность композита малосущественно. У стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры ситуация противоположная –

разрушение происходит за счет потери прочности связующего при деформациях растяжения 2,3–2,7 %, что значительно меньше предельных деформаций волокон (3,8–4,0 %) [9]. Поскольку экспериментальное изучение распределения напряжений в структурных элементах композитной строительной арматуры трудноосуществимо, представляет интерес расчетная оценка этих напряжений с учетом влияния степени наполнения, а также модулей упругости и различий коэффициентов Пуассона.

Цель работы – расчетная оценка напряжений в элементах композитной строительной арматуры, обусловленных различиями коэффициентов Пуассона армирующих волокон и полимерного связующего.

Методика математического моделирования и расчетной оценки локальных напряжений

При численном моделировании термоупругих напряжений в волокнистых композитах обычно используют элементарные ячейки в виде элементарных призм с расположенным в центре стержнем [16]. Применительно к рассматриваемому случаю для равномерного распределения волокон по сечению такая ячейка имеет форму шестигранника (рис. 1). Вместе с тем для аналитических методов прогнозной оценки микроконтактных взаимодействий волокнистого наполнителя с матрицей удобно

принять элементарные ячейки в форме толстостенного полого микроцилиндра [17], в полости которого расположены в виде соединения с натягом волокнистые частицы (рис. 1b, c). Поэтому заменим элементарную ячейку с шестигранным поперечным сечением на эквивалентную ячейку в виде полых полимерных цилиндров с наружным радиусом R_m и внутренним R_f . Эквивалентность ячеек заключается в обеспечении равной степени объемного содержания волокон, или равенства площадей поперечного сечения в форме шестигранника и круга.

Определим значение внешнего радиуса R_m из условия равенства площади элементарного шестигранника со стороной a и эквивалентного круга. Нетрудно убедиться, что площадь шестигранника A_u равна

$$A_u = 6 \cdot \frac{1}{2} a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} a = \frac{3\sqrt{3}}{2} a^2. \quad (1)$$

Площадь эквивалентного круга A_k

$$A_k = \pi R_m^2. \quad (2)$$

Приравняв площади из (1) и (2), получаем взаимосвязь радиуса эквивалентного круга R_m и стороны a шестигранника

$$R_m = a \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}} = 0,9096a. \quad (3)$$

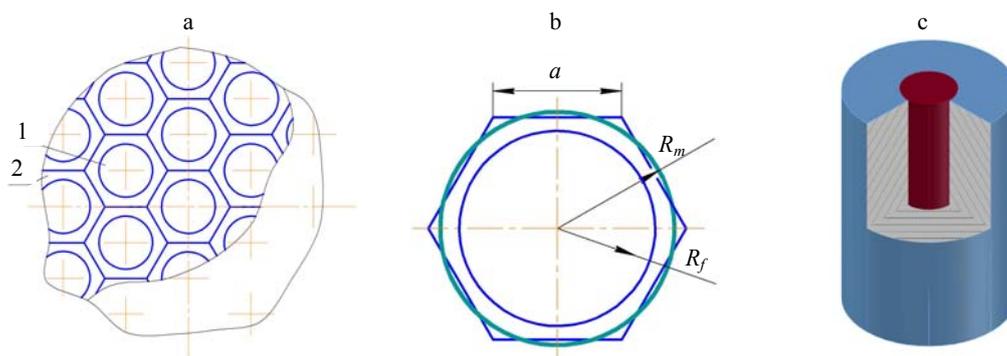


Рис. 1. Расчетная схема для определения параметров элементарных ячеек: а – условное изображение поперечного сечения стержня с шестигранными ячейками; б – изображение шестигранного и эквивалентного кругового поперечного сечения элементарной ячейки с характеристическими размерами; в – объемное изображение цилиндрической ячейки; 1 – волокно; 2 – полимерная матрица

Fig. 1. Calculation scheme for determining the parameters of elementary cells: a – conventional image of the cross-section of a rod with hexagonal cells; b – image of a hexagonal and equivalent circular cross-section of an elementary cell with characteristic dimensions; c – volumetric image of a cylindrical cell; 1 – fiber; 2 – polymer matrix

Анализ показывает, что R_m на 5 % превышает радиус *вписанной* в шестиугольник окружности, который вычисляется как длина перпендикуляра, проведенного из центра окружности на сторону a шестиугольника. Таким образом, минимальная толщина стенки шестиугольной призмы на 5 % отличается от толщины стенки приведенного цилиндра, что вызовет некоторую погрешность расчетов при замене шестиугольника на цилиндр.

Поскольку радиус волокон R_f равен радиусу внутренней полости элементарного цилиндра, наружный диаметр R_m можно вычислить через объемное содержание волокнистого наполнителя V_f , связанное с радиусами R_f и R_m при помощи следующей формулы:

$$V_f = \frac{\pi R_f^2}{\pi R_m^2} = \left(\frac{R_f}{R_m} \right)^2. \quad (4)$$

Откуда для внешнего радиуса элементарной ячейки можно записать

$$R_m = \frac{R_f}{\sqrt{V_f}}. \quad (4a)$$

Композитная строительная арматура работает преимущественно на растяжение. Рассмотрим деформации элементов ячейки с использованием принципа независимости действия сил (принцип суперпозиции) при определении деформаций волокна и матрицы в радиальном направлении. Обозначим действующие в осевом направлении напряжения растяжения в волокне и полимерном связующем (матрице) через σ_{f0} и σ_{m0} соответственно.

Относительные поперечные (радиальные) деформации волокна ε_{fr} и полимерной матрицы ε_{mr} в зоне контакта с волокном при растяжении связаны с продольными деформациями через соответствующие коэффициенты Пуассона. В соответствии с принципом суперпозиции на основании закона Гука можно записать, что поперечные деформации от действия только осевых напряжений σ_{f0} и σ_{m0} могут быть определены как:

$$\varepsilon_{fr} = -\mu_f \frac{\sigma_{f0}}{E_f}; \quad (5a)$$

$$\varepsilon_{mr} = -\mu_m \frac{\sigma_{m0}}{E_m}. \quad (5б)$$

где E_f , E_m , μ_f и μ_m – соответственно модули упругости и коэффициенты Пуассона армирующих волокон и полимерного связующего (матрицы).

Разность Δ поперечных деформаций армирующих волокон и полимерной матрицы, создающих деформационный натяг в сопряжении при растяжении системы, составляет

$$\Delta = \varepsilon_{fr} - \varepsilon_{mr} = \mu_m \frac{\sigma_{m0}}{E_m} - \mu_f \frac{\sigma_{f0}}{E_f}. \quad (6)$$

Произведем оценку возникающих контактных давлений в сопряжении волокно–матрица, обусловленных различиями коэффициентов Пуассона. Поскольку это своего рода сопряжение с натягом, контактные давления p_c можно вычислить по формуле Ляме [18, 19]

$$p_c = \frac{\Delta}{\frac{1-\mu_f}{E_f} + \frac{1}{E_m} \left(\frac{R_m^2 + R_f^2}{R_m^2 + R_f^2} + \mu_m \right)}. \quad (7)$$

Подставив в полученную формулу значение Δ из (6) и заменив радиусы элементарной ячейки R_f и R_m через объемное содержание волокнистого наполнителя V_f по формуле (4), зависимость (7) можно преобразовать к виду

$$p_c = \frac{\mu_m \frac{\sigma_{m0}}{E_m} - \mu_f \frac{\sigma_{f0}}{E_f}}{\frac{1-\mu_f}{E_f} + \frac{1}{E_m} \left(\frac{1+V_f}{1-V_f} + \mu_m \right)}. \quad (8)$$

Выполним анализ характера распределения напряжений в элементах системы. В соответствии с известным решением задачи теории упругости радиальные и тангенциальные напряжения в армирующих волокнах, не содержащих внутренних полостей, равны между собой и совпадают с контактным давлением p_c . У элементарного полимерного цилиндра, находящегося под действием внутреннего давления p_c [21, 22], радиальные напряжения σ_{mr} на внутренней поверхности ($r = R_f$) являются сжимающими и численно равны контактному

давлению p_c , а на внешней поверхности они равны нулю. Тангенциальные напряжения σ_{mt} в элементарном цилиндре являются растягивающими и определяются в любой точке на расстоянии r от оси цилиндра по формуле Ляме

$$\sigma_{mt} = p_c \frac{R_f^2}{R_m^2 - R_f^2} \left(1 + \frac{R_m^2}{r^2} \right). \quad (9)$$

С учетом взаимосвязи между радиусами элементарного цилиндра и объемным содержанием волокон в форме (4) эти напряжения на внутренней поверхности элементарного цилиндра ($r = R_f$) можно рассчитать по следующей зависимости:

$$\sigma_{m1} = p_c \frac{R_e^2 + R_f^2}{R_e^2 - R_f^2} = p_c \frac{1 + V_f}{1 - V_f}. \quad (10)$$

Аналогично для тангенциальных напряжений на наружной поверхности элементарного цилиндра ($r = R_m$)

$$\sigma_{m2} = p_c \frac{2R_f^2}{R_e^2 - R_f^2} = p_c \frac{2V_f}{1 - V_f}. \quad (11)$$

Сравнение аналитических зависимостей (10) и (11) показывает, что окружные (тангенциальные) напряжения, действующие в полимерной матрице, имеют максимальное значение вблизи границы раздела с армирующим волокном (σ_{m1}), а минимальные – на наружной поверхности элементарного цилиндра (σ_{m2}), соответствующей середине расстояния между волокнами. При этом величина тангенциальных растягивающих напряжений зависит от возникающего контактного давления p_c и объемного содержания волокнистого наполнителя V_f . Характер распределения радиальных и тангенциальных напряжений в межволоконном пространстве композита показан на рис. 2.

Поскольку в уравнение (8) входят три неизвестных параметра (контактное давление p_c , осевые напряжения в матрице σ_{m0} и в волокнах σ_{f0}), для их определения составим дополнительные уравнения из условия совместности деформаций в виде гипотезы плоских сечений. Принимаем, что деформации волокон, матрицы и композита в осевом направлении равны и подчиняются обобщенному закону Гука.

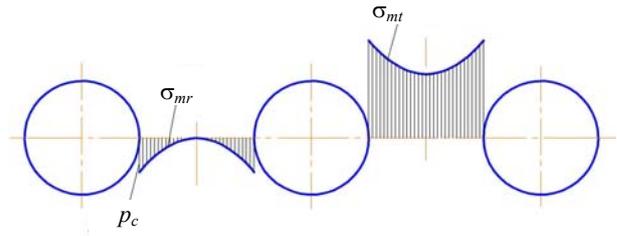


Рис. 2. Характер распределения радиальных и тангенциальных напряжений в межволоконном пространстве полимерной матрицы

Fig. 2. Nature of the distribution of radial and tangential stresses in the inter-fiber space of the polymer matrix

С использованием такого подхода для осевых деформаций компонентов системы в точке сопряжения минерального волокна с полимерной матрицей можно записать:

$$\varepsilon_{f0} = \frac{1}{E_f} [\sigma_{f0} - \mu_f (\sigma_{fr} + \sigma_{ft})] = \varepsilon_{k0}; \quad (12a)$$

$$\varepsilon_{m0} = \varepsilon_{k0} = \frac{1}{E_m} [\sigma_{m0} - \mu_m (\sigma_{mr} + \sigma_{mt})]. \quad (12б)$$

Решив систему (12a) и (12б), находим осевые напряжения в волокне и полимерной матрице:

$$\sigma_{f0} = \varepsilon_{k0} E_f - 2\mu_f p_c; \quad (13a)$$

$$\sigma_{m0} = \varepsilon_{k0} E_m + 2\mu_m p_c \frac{V_f}{1 - V_f}. \quad (13б)$$

Подставив эти значения в формулу (8), получаем зависимость для расчетной оценки возникающих контактных давлений

$$p_c = \frac{(\mu_m - \mu_f)(1 - V_f)\varepsilon_{k0} E_m}{\frac{E_m}{E_f}(1 - \mu_f - 2\mu_f^2)(1 - V_f) + 1 + V_f - 2\mu_m^2 V_f} \rightarrow \frac{(\mu_m - \mu_f)(1 - V_f)\varepsilon_{k0} E_m}{+ \mu_m (1 - V_f) + 1 + V_f - 2\mu_m^2 V_f}. \quad (14)$$

Нетрудно убедиться, что входящее в формулу (14) произведение $\varepsilon_{k0} E_m$ представляет собой номинальное осевое напряжение в полимерной матрице σ_{m0} , рассчитываемое без учета упругого изменения площади поперечного сечения матрицы и волокон. При использовании такого обозначения формула (14) может быть записана в следующем виде:

$$p_c = \frac{(\mu_m - \mu_f)(1 - V_f)}{\frac{E_m}{E_f}(1 - \mu_f - 2\mu_f^2)(1 - V_f) + \mu_m(1 - V_f) + 1 + V_f - 2\mu_m^2 V_f} \sigma_{mn}. \quad (15)$$

Как видно из (15), возникающее контактное давление прямо пропорционально действующим растягивающим номинальным напряжениям в полимерной матрице σ_{mn} и по более сложной функциональной зависимости изменяется при изменении модулей упругости и коэффициентов Пуассона материалов волокна и полимерной матрицы. Окружные (тангенциальные) напряжения σ_m в полимерной матрице в точке контакта с минеральным волокном могут быть определены по формуле (10), подставив в нее значение контактного давления из (15).

Совокупность полученных аналитических зависимостей (10), (11) и (15) позволяет производить математическое моделирование влияния степени наполнения на изменение локальных микроконтактных напряжений в полимерной матрице, если известны входящие в эти уравнения показатели физико-механических свойств полимерных материалов и армирующих волокон.

Результаты исследования и их обсуждение

Моделирование и сравнительный анализ параметров локального микроконтактного взаимодействия произведем на базе наиболее широко распространенных в промышленности при производстве композитной строительной арматуры стеклянных и базальтовых волокон, а также эпоксидных и полиэфирных смол. Показатели механических свойств волокон зависят от вида волокна и сырья для его производства. Для стеклянных волокон марки E , наиболее широко распространенных при производстве стеклопластиковой арматуры, модуль упругости E_f и коэффициент Пуассона μ_f находятся в следующих диапазонах: $E_f = 70-73,5$ ГПа, $\mu_f = 0,22-0,23$ [20–24]. Для базальтовых волокон соответствующие показатели деформационных свойств составляют: $E_f = 79-93$ ГПа, $\mu_f = 0,23-0,24$ [20–24].

Деформационные свойства полимерных связующих зависят от рода связующего, вида отвер-

дителя, режимов отверждения и других факторов. Для полиэфирных смол этот диапазон составляет: $E_m = 2,2-2,8$ ГПа, $\mu_m = 0,35-0,39$, а для эпоксидных $E_m = 2,5-3,5$ ГПа, $\mu_m = 0,38-0,40$ [20–24]. Дальнейшие исследования проведены для перечисленного выше диапазона изменения показателей механических свойств.

Поскольку входящие в знаменатель формулы (15) слагаемые имеют различную величину, выполним вначале их сравнительный анализ путем расчета слагаемого

$$\eta = \frac{E_m}{E_f}(1 - \mu_f - 2\mu_f^2)(1 - V_f). \quad (16)$$

Результаты определения величины η для широкого диапазона изменения объемного содержания наполнителя V_f на примере стекловолокна марки E , базальтового волокна и эпоксидной смолы ЭД 20 приведены в табл. 1. Расчет выполнен методом верхней оценки, поскольку максимальное значение параметра η соответствует минимальной величине коэффициента Пуассона волокон ($\mu_f = 0,22$). Модуль упругости отвержденной эпоксидной смолы принят в диапазоне от 2,0 до 3,5 ГПа. Широкий диапазон изменения объемного содержания волокон в композите ($V_f = 0,50-0,70$) принят с целью учета продукции не только отечественных, но и зарубежных [12, 20] производителей.

Таблица 1

Расчетные значения параметра η для системы минеральное волокно – полимерная матрица

Calculated values of the parameter η for the mineral fiber – polymer matrix system

Модуль упругости, ГПа		Значение параметра η при объемном содержании минерального волокна V_f		
волокна E_f	полимера E_m	0,50	0,60	0,70
73,5	2,0	0,0093	0,0074	0,0056
	2,5	0,0116	0,0093	0,0070
	3,0	0,0139	0,0112	0,0084
	3,5	0,0163	0,0130	0,0098
81	2,0	0,0084	0,0067	0,0051
	2,5	0,0105	0,0084	0,0063
	3,0	0,0127	0,0101	0,0076
	3,5	0,0148	0,0118	0,0089

Таблица 2

Расчетные значения относительных контактных давлений p_c/σ_{mn} на границе раздела волокнистого наполнителя с полимерной смолой

Calculated values of relative contact pressures p_c/σ_{mn} at the interface of fibrous filler with polymer resin

Коэффициент Пуассона		Расчетное значение p_c/σ_{mn} при объемном содержании V_f волокна		
волокна μ_f	матрицы μ_m	0,50	0,60	0,70
0,22	0,35	0,042	0,033	0,024
	0,37	0,049	0,038	0,028
	0,40	0,060	0,047	0,035
0,23	0,35	0,039	0,030	0,022
	0,37	0,045	0,035	0,026
	0,40	0,055	0,043	0,032
0,24	0,35	0,036	0,028	0,020
	0,37	0,042	0,033	0,024
	0,40	0,052	0,041	0,030

Как видно из табл. 1, во всем исследованном диапазоне изменения объемного содержания минерального волокна V_f и модуля упругости отвержденной эпоксидной смолы значение параметра η является величиной, не превышающей 1 % от значений слагаемых $(1 + V_f = 1,5-1,7)$, входящих в знаменатель дроби в формулах (14) и (15). Этот вывод справедлив также и для отвержденных полиэфирных смол, поскольку их модуль упругости (табл. 1) находится внутри рассмотренного диапазона.

Таким образом, при технических расчетах параметром η , учитывающим влияние модулей упругости армирующего волокна и полимерной матрицы в стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуре, можно пренебречь и производить определение контактного давления по следующей упрощенной формуле:

$$p_c = \frac{(\mu_m - \mu_f)(1 - V_f)}{1 + V_f + \mu_m(1 - V_f) - 2\mu_m^2 V_f} \sigma_{mn}. \quad (17)$$

Подставив (17) в (11), получаем аналитическую зависимость для определения окружных (тангенциальных) напряжений в полимерной матрице

$$\sigma_{tm} = \frac{(\mu_m - \mu_f)(1 + V_f)}{1 + V_f + \mu_m(1 - V_f) - 2\mu_m^2 V_f} \sigma_{mn}. \quad (18)$$

Осевые напряжения в полимерной матрице, на основании формул (13б) и (17), описываются следующей аналитической зависимостью

$$\sigma_{m0} = \frac{1 + V_f + \mu_m(1 - V_f) - 2\mu_m \mu_f V_f}{1 + V_f + \mu_m(1 - V_f) - 2\mu_m^2 V_f} \sigma_{mn}. \quad (19)$$

Сравнение числителя и знаменателя в формуле (19) показывает, что они отличаются только последними слагаемыми, являющимися величинами второго порядка малости в сравнении со слагаемыми $(1 + V_f)$. Это дает основание полагать, что фактические σ_{m0} и номинальные σ_{mn} напряжения, действующие в матрице в осевом направлении, будут отличаться незначительно.

В табл. 2 приведены расчетные значения относительных контактных давлений, численно равных радиальным и тангенциальным напряжениям в волокнах композита, для широкого диапазона изменения коэффициента Пуассона матрицы.

Из полученных данных видно, что в диапазоне объемного содержания наполнителя $V_f = 0,5-0,7$ контактные давления на границе раздела армирующих волокон с полимерной матрицей составляют от 2 до 6 % от номинальных напряжений растяжения в полимерной матрице, что можно считать величиной второго порядка малости.

Расчет по формуле (19) показывает, что значения осевых растягивающих напряжений в полимерном связующем превышают на 2,9-6,3 % соответствующие номинальные значения (полученные по правилу аддитивности без учета упругого изменения площади сечения компонентов и различия коэффициентов Пуассона) для стеклопластиковой и на 3,5-5,6 % – для базальтопластиковой арматуры. Причем меньшие значения соответствуют объемному содержанию волокон $V_f = 0,5$, а большие $V_f = 0,7$.

Вместе с тем представляет интерес расчетная оценка величины действующих в тангенциальном направлении растягивающих напряжений, вызванных этим контактным давлением. В табл. 3 приведены соответствующие значения максимальных растягивающих напряжений, действующих на границе раздела полимера с волокном, а также минимальных растягивающих тангенциальных напряжений, действующих в середине расстояния между волокнами.

Расчетные значения относительных максимальных $\sigma_{tm \max}/\sigma_{mn}$ и минимальных $\sigma_{tm \min}/\sigma_{mn}$ растягивающих тангенциальных напряжений в полимерной матрице

Calculated values of relative maximum $\sigma_{tm \max}/\sigma_{mn}$ and minimum $\sigma_{tm \min}/\sigma_{mn}$ tensile tangential stresses in the polymer matrix

Коэффициент Пуассона		Расчетное значение $\sigma_{tm \max}/\sigma_{mn}$ при объемном содержании V_f волокна					
волокна, μ_f	матрицы μ_m	0,50		0,60		0,70	
		max	min	max	min	max	min
0,22	0,35	0,126	0,084	0,131	0,098	0,135	0,111
	0,37	0,146	0,097	0,151	0,113	0,158	0,130
	0,40	0,176	0,117	0,183	0,137	0,192	0,158
0,23	0,35	0,116	0,077	0,121	0,091	0,125	0,103
	0,37	0,136	0,091	0,141	0,106	0,147	0,121
	0,40	0,166	0,111	0,173	0,130	0,181	0,149
0,24	0,35	0,106	0,071	0,110	0,083	0,114	0,094
	0,37	0,126	0,084	0,131	0,098	0,136	0,112
	0,40	0,156	0,104	0,163	0,122	0,171	0,141

Из табл. 3 видно, что максимальные тангенциальные растягивающие напряжения в полимерной матрице на границе раздела с волокном составляют 11,6–19,2 % от номинальных осевых напряжений растяжения σ_{mn} для стеклопластиковой и 10,6–17,1 % – для базальтопластиковой арматуры в зависимости от сочетания коэффициентов Пуассона волокна и полимера. Минимальные растягивающие тангенциальные напряжения, действующие на середине расстояния между волокнами, составляют 7,7–15,8 % от σ_{mn} для стеклопластиковой и 7,1–14,1 % от σ_{mn} для базальтопластиковой арматуры. Такой уровень тангенциальных напряжений свидетельствует о том, что их роль в разрушении композита существенна и в настоящее время недооценивается.

Еще одним представляющим интерес фактором является некоторое снижение окружных растягивающих напряжений в полимерной матрице в окрестности базальтовых волокон в сравнении со стеклянными. Это способствует увеличению предельных деформаций при разрыве базальтопластиковой арматуры и указывает на перспективность базальтового волокна как армирующего наполнителя для композитной строительной арматуры.

ВЫВОДЫ

1. Результаты выполненных исследований позволили разработать инженерную методику

расчетной оценки параметров напряженного состояния полимерной матрицы в окрестностях волокнистого наполнителя в композитной строительной арматуре как функций от действующих номинальных растягивающих напряжений, объемного содержания волокон, а также показателей механических свойств волокон и полимерных матриц.

2. Определены значения этих параметров применительно к широкому диапазону изменения объемного содержания волокон, а также показателей деформационных свойств, характерному для промышленно выпускаемой строительной композитной арматуры.

3. Показано, что вклад локальных микроконтактных напряжений в полимерном связующем на прочность стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры существенный и в настоящее время недооценен. Результаты исследований могут быть использованы в научно-исследовательской и учебной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1R-06. Detroit: American Concrete Institute (ACI), 2006. 44 p.
2. Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers: CAN/CSA-S806-02 (R2007). Canadian Standards Association, 2012. 206 p.
3. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials /

- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Tokyo: JSCE. 1997. 199 p. (Concrete Engineering, Series 23).
4. Jarek, B. Zastosowanie Prętów Zbrojeniowych z Włókna Szklanego (GFRP) w Budownictwie / B. Jarek, A. Kubik // *Przegląd budowlany*. 2015. No 012. P. 21–26.
 5. Development of Ductile Composite Reinforcement Bars for Concrete Structures / Y. Cui, M. S. M. Cheung, B. Noruziaan [et al.] // *Materials and Structures*. 2008. Vol. 41, No 9. P. 1509–1518. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9344-8>.
 6. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars: CNR-DT 203/2006. Rome: Italian National Research Council (CNR), 2006. 35 p.
 7. Корягин, С. И. Несущая способность композиционных материалов / С. И. Корягин. Калининград: Калининград. ун-т, 1996. 301 с.
 8. Tensile fracture specificity of unidirectional metal-polymer glass-fiber composites with cord wire / M. Yu. Ashcherkau, S. V. Shil'ko, T. V. Drobysh, H. Choe // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2020. No 3 (52). P. 55–61. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-55-62>.
 9. Barsukov, V. G. Structural and Mechanical Aspect of Composite Reinforcement Strength / V. G. Barsukov, A. R. Volik, S. A. Sazon // *E3S Web Conf*. 2020. Vol. 212. P. 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021202002>.
 10. Садин, Э. Я. Анкеровка в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь / Э. Я. Садин // *Архитектура и строительство*. 2016. № 3. С. 68–71.
 11. Особенности испытаний и характер разрушения полимеркомпозитной арматуры / А. Р. Гидзатулин, В. Г. Хозин, А. Н. Куклин, А. М. Хуснутдинов // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 3. С. 40–50.
 12. Castro, P. F. Tensile and Nondestructive Testing of FRP bars / P. F. Castro, N. J. Carino // *J. Compos. Constr.* 1998. Vol. 2, No 1. P. 17–27. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(1998\)2:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(1998)2:1(17)).
 13. Василевич, Ю. В. Влияние химической усадки связующего в процессе отверждения на образование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композита / Ю. В. Василевич, К. А. Горельий, С. В. Сахоненко, С. Н. Иванов // *Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб.* Минск: БНТУ. 2016. Вып. 31. С. 67–72.
 14. Скудра, А. М. Прочность армированных пластиков / А. М. Скудра, Ф. Я. Булавс. М.: Химия, 1982. 213 с.
 15. Модельные представления о механике межфазного микроконтактного взаимодействия в чугунах с вермикулярным графитом / В. Г. Барсуков, А. Е. Шишкин, Б. Крупиц, В. В. Барсуков // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр.* Минск: Промпечать, 2013. Вып. 2. С. 382–387.
 16. Dems, K. Modeling of Fiber Reinforced Composite Materials Subjected to Thermal Load / K. Dems, E. Radaszewska, J. Turant // *Journal of Thermal Stresses*. 2012. Vol. 35, No 7. P. 579–595. <https://doi.org/10.1080/01495739.2012.674786>.
 17. Барсуков, В. Г. Параметры элементарных ячеек для аналитического определения термоупругих усадочных напряжений в наполненных термопластах / В. Г. Барсуков, Е. В. Грахольская // *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка*. 2020. Т. 10, № 2. С. 32–40.
 18. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев; отв. ред. Г. С. Писаренко. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.
 19. Прикладная механика / А. Т. Скойбеда, А. А. Миклашевич, Е. Н. Левковский [и др.] / под общ. ред. А. Т. Скойбеда. Минск: Высш. шк., 1997. 522 с.
 20. Мэттьюз, Ф. Композитные материалы: механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс; пер. с англ. С. Л. Баженев. М.: Техносфера, 2004. 406 с.
 21. Композиционные материалы: справ. / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин [и др.] / под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
 22. Композиционные материалы: справ. / Л. Р. Вишняков, Т. В. Грудина, В. Х. Кадыров [и др.]; под ред. Д. М. Карпиноса. Киев: Наук. думка, 1985. 592 с.
 23. Миненков, Б. В. Прочность деталей из пластмасс / Б. В. Миненков, И. В. Стасенко. М.: Машиностроение, 1977. 264 с.
 24. FRP reinforcement in RC structures: Technical report. fib CEP=FIP. 2007. Bulletin 40. 147 p. URL: <https://www.alientechnologies.ru/docs/40%20-%20FRP%20reinforcement%20in%20RC%20structures.pdf>

Поступила 10.09.2024

Подписана в печать 19.11.2024

Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. ACI 440.1R-06. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. Detroit: American Concrete Institute (ACI), 2006. 44.
2. CAN/CSA-S806-02 (R2007). *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*. Canadian Standards Association, 2012. 206.
3. Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (1997). *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Concrete Engineering, Series 23*. Tokyo, JSCE. 199.
4. Jarek B., Kubik A. (2015) Zastosowanie Prętów Zbrojeniowych z Włókna Szklanego (GFRP) w Budownictwie. *Przegląd Budowlany*, (012), 21–26.
5. Cui Y., Cheung M. M. S., Noruziaan B., Lee S., Tao J. (2008) Development of Ductile Composite Reinforcement Bars for Concrete Structures. *Materials and Structures*, 41 (9), 1509–1518. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9344-8>.
6. CNR-DT 203/2006. *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Rome, Italian National Research Council (CNR), 2006. 35.
7. Koryagin S. I. (1996) *Load-Bearing Capacity of Composite Materials*. Kaliningrad, Kaliningrad University. 301 (in Russian).

8. Ashchepkau M. Yu., Shil'ko S. V., Drobysh T. V., Choe H. (2020) Tensile Fracture Specificity of Unidirectional Metal-Polymer Glass-Fiber Composites With Cord Wire. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 3 (52), 55–62. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-55-62>.
9. Barsukov V. G., Volik A. R., Sazon S. A. (2020) Structural and Mechanical Aspect of Composite Reinforcement Strength. *E3S Web Conf.*, 212, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021202002>.
10. Sadin E. Ya. (2016) Anchoring of Fiberglass Reinforcement in Concrete Produced in the Republic of Belarus. *Arkhitektura i Stroitelstvo* [Architecture and Construction], (3), 68–71 (in Russian).
11. Gizdatullin G. A., Khozin V. G., Kuklin A. N., Khusnutdinov A. M. (2014) Specifics of Testing and Fracture Behavior of Fibre-Reinforced Polymer Bars. *Magazine of Civil Engineering*, 47 (3), 40–47. <https://doi.org/10.5862/mce.47.4>(in Russian).
12. Castro P. F., Carino N. J. (1998) Tensile and Nondestructive Testing of FRP Bars. *Journal of Composites for Construction*, 2 (1), 17–27. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(1998\)2:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(1998)2:1(17)).
13. Vasilevich Yu. V. (2016) The Influence of Chemical Shrinkage of the Binder during Curing Process on the Formation of Residual Stresses in Cylindrical Composite Shells. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhdunar. nauch.-tekhn. sb.* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, BNTU, Iss. 31, 67–72 (in Russian).
14. Skudra A. M., Bulavs F. Ya. (1982) *Strength of Reinforced Plastics*. Moscow, Khimiya Publ. 213 (in Russian).
15. Barsukov V. G. Shishkin A. E., Krupich B., Barsukov V. V. (2013) Model Concepts of the Mechanics of Interphase Microcontact Interaction in Cast Irons with Vermicular Graphite. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr.* [Actual Issues of Mechanical Engineering: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Prompechat Publ., Iss. 2, 382–387 (in Russian).
16. Dems K., Radaszewska E., Turant J. (2012) Modeling of Fiber-Reinforced Composite Material Subjected to Thermal Load. *Journal of Thermal Stresses*, 35 (7), 579–595. <https://doi.org/10.1080/01495739.2012.674786>.
17. Barsukov V. G., Grakholskaya E. V. (2020) Parameters of Elementary Cells for Analytical Determination of Thermoelastic Shrinkage Stresses in Filled Thermoplastics. *Vesnik Hrodzenskaha Dziarzhaunaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seryia 6. Tekhnika = Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*, 10 (2), 32–40 (in Russian).
18. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. (1988) *Handbook of Strength of Materials*. 2nd ed. Kiev, Naukova Dumka Publ. 736 (in Russian).
19. Skoibeda A. T., Miklashevich A. A., Levkovskii E. N. [et al.] (1997) *Applied Mechanics*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ. 522 (in Russian).
20. Matthews F., Rawlings R. (1999) *Composite Materials: Engineering and Science*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-17714-8>.
21. Vasil'ev V. V., Protasov V. D., Bolotin V. V. [et al.] (1990) *Composite Materials: Handbook*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 512 (in Russian).
22. Minenkov B. V., Stasenko I. V. (1977) *Strength of Plastic Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 264 (in Russian).
23. International Federation for Structural Concrete (fib) (2007) *FRP Reinforcement in RC Structures: Technical Report*. Bulletin 40. 147. Available at: <https://www.alien-technologies.ru/docs/40%20-%20FRP%20reinforcement%20in%20RC%20structures.pdf>.

Received: 10.09.2024

Accepted: 19.11.2024

Published online: 31.03.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-134-142>

УДК 69.059.2

Оценка технического состояния кровель крупнопанельных жилых зданий, возведенных в Беларуси до 1993 г.

Кандидат техн. наук, доц. Н. В. Черноиван¹⁾

¹⁾Брестский государственный технический университет (Брест, Республика Беларусь)

Реферат. В статье дана оценка технического состояния совмещенных утепленных рулонных кровель с последовательным расположением слоев и вентилируемых кровель крупнопанельных жилых зданий типовых серий, построенных в Беларуси до 1993 г. Результаты натурных исследований показали, что после более 30 лет эксплуатации техническое состояние материалов основных конструктивных слоев (несущая конструкция покрытия, пароизоляция, материалы теплоизоляционного слоя) работоспособное. Дефекты, оказывающие отрицательное влияние на функциональную пригодность кровель в целом, зафиксированы только в основном водоизоляционном ковре и цементно-песчаной стяжке. Установлено, что причинами появления и развития эксплуатационных дефектов (потеря защитной посыпки кровельным материалом, застой воды на кровле, трещины в битумном окрасочном слое рулонной кровли, вздутия между слоями кровельного рулонного ковра) являются «жесткие» условия эксплуатации кровель: постоянное, в течение всего срока эксплуатации, влияние на материалы атмосферных воздействий, а также нарушения технологии производства кровельных работ. Для поддержания рабочего состояния совмещенных утепленных рулонных кровель крупнопанельных жилых зданий, эксплуатируемых более 30 лет, основные материальные и финансовые затраты приходится на частичный ремонт водоизоляционного ковра, включающий и локальный ремонт цементно-песчаной стяжки. Причиной локального разрушения стяжки кровель крупнопанельных жилых зданий, построенных до 1993 г., является недостаточная ее морозостойкость, обусловленная заложенным при проектировании таких зданий требованием обеспечения прочности материала стяжки по морозостойкости на нормируемый срок эксплуатации крупнопанельных жилых здания, т. е. не менее чем на 30 лет. Учитывая, что нормируемый срок эксплуатации всех крупнопанельных жилых зданий, построенных до 1993 г., составляет более 30 лет, проблема обеспечения работоспособности стяжки будет приобретать все большую актуальность. Предлагается для увеличения срока эксплуатации стяжки без ремонта и снижения теплопотерь через совмещенное покрытие выполнить по существующей кровле инверсионную кровлю.

Ключевые слова: конструктивные слои кровли, эксплуатационные дефекты, локальные разрушения (размораживание) стяжки, объекты научных исследований

Для цитирования: Черноиван, Н. В. Оценка технического состояния кровель крупнопанельных жилых зданий, возведенных в Беларуси до 1993 г. / Н. В. Черноиван // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 134–142. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-134-142>

Assessment of the Technical Condition of Roofs of Large-Panel Residential Buildings Erected in Belarus before 1993

N. V. Chernoiivan¹⁾

¹⁾Brest State Technical University (Brest, Republic of Belarus)

Abstract. The paper provides an assessment of the technical condition of combined insulated rolled roofs with a sequential arrangement of layers and ventilated roofs of large-panel residential buildings of standard series built in Belarus before 1993. The results of field studies have shown that after more than 30 years of operation, the technical condition of the materials of the main structural layers (bearing structure of the coating, vapor barrier, materials of the thermal insulation layer) is operable. Defects that have a negative impact on the functional suitability of roofs as a whole are recorded only in the main

Адрес для переписки

Черноиван Николай Вячеславович
Брестский государственный технический университет
ул. Московская, д. 267,
224017, г. Брест, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 726-74-56
chernoivan@inbox.ru

Address for correspondence

Chernoivan Nikolai V.
Brest State Technical University
267 Moskovskaya str.,
224017, Brest, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 726-74-56
chernoivan@inbox.ru

waterproofing carpet and cement-sand screed. It has been established that the causes of the appearance and development of operational defects (loss of coarse-grained sprinkling with roofing material, stagnation of water on the roof, cracks in the bitumen coating layer of the rolled roof, swelling between the layers of the rolled roofing carpet) are “harsh” operating conditions of roofs: constant, throughout the entire period of operation, influence on the materials of atmospheric influences, as well as violations of the technology of roofing work. To maintain the working condition of combined insulated rolled roofs of large-panel residential buildings operated for more than 30 years, the main material and financial costs fall on partial repair of the waterproofing carpet, including local repair of cement-sand screed. The reason for the local destruction of the roof screed of large-panel residential buildings built before 1993 is its insufficient frost resistance, due to the requirement laid down in the design of such buildings to ensure the strength of the screed material in terms of frost resistance for the rated service life of large-panel residential buildings, i.e. for at least 30 years. Considering that the standard service life of all large-panel residential buildings built before 1993 is more than 30 years, the problem of ensuring the operability of the screed will become increasingly relevant. It is proposed to extend the service life of the screed without repairs and reduce heat loss through the combined coating to install an inversion roof on the existing roof.

Keywords: structural layers of the roof, operational defects, local destruction (defrosting) screeds, objects of scientific research

For citation: Chernov N. V. (2025) Assessment of the Technical Condition of Roofs of Large-Panel Residential Buildings Erected in Belarus before 1993. *Science and Technique*. 24 (2), 134–142. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-134-142> (in Russian)

Введение

Сегодня в Беларуси более 90 % всех многоэтажных жилых домов имеют совмещенные утепленные рулонные кровли. Обусловлено это тем, что стоимость устройства таких кровель почти на 40 % ниже, чем скатных (чердачных) кровель [1].

Однако, как показывает практика, после 5–8 лет эксплуатации требуется частичный ремонт водоизоляционного рулонного ковра совмещенных утепленных рулонных кровель, несущей конструкцией которых являются многопустотные сборные железобетонные плиты [2, 3]. Причиной протечек кровель является появление дефектов (микротрещин) в водоизоляционном рулонном материале, динамика развития которых зависит от влажности материала теплоизоляционного слоя [4].

Натурные исследования эксплуатируемых кровель жилых кирпичных зданий, в которых несущие конструкции покрытия, как правило, выполнены из многопустотных сборных железобетонных плит шириной 1,2–1,5 м, позволили установить, что увлажнение материала утеплителя в совмещенных покрытиях происходит за счет проникновения водяных паров воздуха из жилых помещений через зазоры в швах панелей покрытия [4]. Причиной этого являются следующие факторы. Применение в эксплуатируемых жилых кирпичных зданиях для заделки швов между панелями покрытия цементно-песчаного раствора марки не выше М25 не

обеспечивает совместную работу многопустотных сборных железобетонных плит. Каждая плита покрытия самостоятельно воспринимает нагрузки от снега и неравномерной осадки несущих стен здания. Такое сочетание нагрузок приводит к появлению вертикальных перемещений плит покрытия и, как следствие, вызывает разрушение материала оклеечной пароизоляции и цементно-песчаного раствора в швах панелей покрытия [5].

Базируясь на результатах натурных исследований [1–5], сегодня эта проблема решена: разработано и массово применяется конструктивное решение заделки швов между плитами в виде шпонки из мелкозернистой бетонной смеси марки не ниже М100, которое обеспечивает совместную работу многопустотных плит в покрытиях.

Наряду с кирпичными жилыми зданиями с середины 60-х гг. прошлого века в Республике Беларусь массово эксплуатируются крупнопанельные жилые здания, объем которых сегодня составляет более 55 % всего жилищного фонда [6].

Изучение научных публикаций в открытой печати и ресурсах Интернет, посвященных оценке технического состояния ограждающих конструкций крупнопанельных жилых зданий, показало, что все опубликованные результаты исследований по данной тематике посвящены техническому состоянию стеновых панелей и межпанельных стыков [7–9]. Информация о техническом состоянии конструктивных сло-

ев кровель крупнопанельных жилых зданий фактически отсутствует.

Применение в крупнопанельных жилых зданиях в качестве несущей конструкции покрытия сборных железобетонных плит размерами на комнату практически полностью исключает наличие швов между ними, что, очевидно, является фактором, оказывающим существенное влияние на условия эксплуатации таких кровель в целом.

В связи с изложенным и учитывая, что сегодня в Республике Беларусь большой объем жилого фонда составляют эксплуатируемые длительное время (более 30 лет) крупнопанельные здания типовых серий, исследования технического состояния конструктивных слоев кровель таких зданий являются актуальной задачей.

Методика выполнения научных исследований

Объектами исследований являются кровли крупнопанельных жилых зданий серий 1-335, 1-335А, 1-464, 1-464А и их модификаций, запроектированные и выполненные согласно строительным нормам (СНиП) бывшего СССР, действовавшим в Беларуси до 1993 г., а именно:

- СНиП II-26-76 «Кровли»;
- СНиП III-20-74 «Кровли, гидроизоляция, пароизоляция и теплоизоляция»;
- СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника».

Выбор для проведения натурных исследований крупнопанельных жилых зданий перечисленных выше серий обусловлен тем, что такие дома составляют значительный объем жилого фонда практически всех микрорайонов городов Беларуси. Следует отметить, что общее количество только зданий серии 1-464, эксплуатируемых 30 лет и более, на сегодня составляет более двух тысяч.

Визуальное обследование крупнопанельных жилых зданий старых типовых серий и их модификаций позволяет сделать следующий вывод.

Все здания имеют совмещенные утепленные кровли с водоизоляционным ковром из рулонных материалов. Согласно [10], такие кровли по конструктивному решению классифицируются на:

- кровли, в которых все слои последовательно уложены на несущую конструкцию и покрыты водоизоляционным ковром (рис. 1);
- вентилируемые (двухоболочковые) кровли (рис. 2).

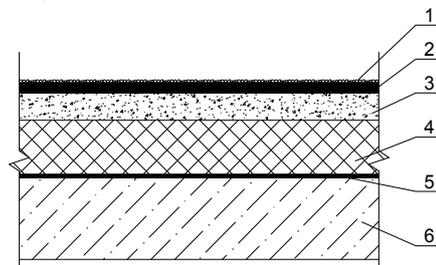


Рис. 1. Совмещенная кровля, в которой все слои последовательно уложены на несущую конструкцию и покрыты водоизоляционным ковром:

- 1 – защитный слой; 2 – водоизоляционный ковер;
- 3 – выравнивающая стяжка; 4 – теплоизоляционный слой;
- 5 – пароизоляция; 6 – несущая конструкция покрытия

Fig. 1. Combined roof, in which all layers sequentially laid on the supporting structure and covered with a waterproofing carpet: 1 – protective layer; 2 – waterproofing carpet; 3 – leveling screed; 4 – thermal insulation layer; 5 – vapor barrier; 6 – load-bearing structure of the coating

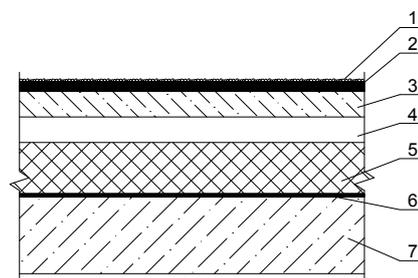


Рис. 2. Вентилируемая (двухоболочковая) кровля: 1 – защитный слой; 2 – водоизоляционный ковер; 3 – верхняя несущая конструкция; 4 – воздушная прослойка (технический этаж); 5 – теплоизоляционный слой; 6 – пароизоляция; 7 – нижняя несущая конструкция

Fig. 2. Ventilated (double-walled) roof: 1 – protective layer; 2 – waterproofing carpet; 3 – upper load-bearing structure; 4 – air layer (technical floor); 5 – thermal insulation layer; 6 – vapor barrier; 7 – lower load-bearing structure

Число крупнопанельных зданий с вентилируемыми кровлями (рис. 2) по сравнению со зданиями, имеющими совмещенные кровли, в которых все слои последовательно уложены (рис. 1), невелико и составляет не более 5 % от всего количества эксплуатируемых крупнопанельных жилых зданий. Объясняется это тем, что материалоемкость и трудоемкость устрой-

ства двухоболочковых кровель существенно выше [3, 5].

Для достижения поставленной цели – получения достоверной информации о конструктивных решениях кровель крупнопанельных жилых зданий, примененных в них строительных материалах и причинах, приводящих к появлению в них дефектов, была принята следующая методика проведения научных исследований.

До начала проведения исследований, руководствуясь методикой [11], был определен перечень дефектов, оказывающих негативное влияние на эксплуатационные характеристики совмещенных утепленных рулонных кровель в целом:

- несоответствие конструкции кровли нормативным требованиям;
- протечки от атмосферных воздействий (дождевые или талые воды);
- размораживание стяжки, утеплителя и других слоев кровли;
- застой воды на кровле;
- потеря защитной посыпки кровельным материалом;
- трещины в битумном окрасочном слое рулонной кровли;
- отсутствие сцепления или непрочное сцепление кровельного рулонного ковра со стяжкой;
- вздутия между слоями кровельного рулонного ковра;
- сползание, расслаивание полотнищ рулонных материалов в местах примыкания кровли к выступающим над кровлей конструкциям.

На первом этапе выполнены поисковые исследования – изучено более 25 отчетов натуральных исследований совмещенных утепленных рулонных кровель крупнопанельных жилых зданий. (Отчеты предоставлены ОДО «Техническая диагностика сооружений» и ОАО «Брестжилпроект», имеющими лицензии на проведение натуральных исследований зданий и сооружений и подготовку заключений о техническом состоянии строительных конструкций.)

Для минимизации влияния значимых, на взгляд автора, факторов (климатические условия, правила эксплуатации объектов и др.), которые могут оказать существенное влияние на эксплуатационные характеристики кровель в целом и тем самым повлиять на достоверность выводов результатов исследований, были опре-

делены критерии отбора эксплуатируемых крупнопанельных жилых зданий для исследований:

- срок эксплуатации здания на момент обследования не менее 30 лет (соответствует первоначально установленному сроку эксплуатации крупнопанельных жилых зданий, построенных до 1993 г.);
- слой теплоизоляции выполнен из различных строительных материалов;
- уклоны кровли к водоприемным воронкам имеют различные конструктивные решения;
- кровли эксплуатируются в одинаковых климатических условиях;
- технический надзор за состоянием кровель и их эксплуатацию выполняет специализированная государственная структура (ЖРЭУ).

Для достижения поставленных целей проанализированы результаты натуральных исследований совмещенных утепленных рулонных кровель восьми крупнопанельных жилых домов, отвечающих сформулированным критериям отбора: шесть зданий в г. Бресте, одно здание в г. Березе и два здания в г. Барановичи.

Техническое состояние материалов конструктивных слоев совмещенных утепленных кровель

Для выполнения оценки технического состояния конструктивных слоев таких кровель (рис. 1) были проанализированы результаты натуральных обследований следующих шести крупнопанельных жилых зданий (табл. 1).

Натурные исследования позволили установить следующее:

1. Кровля во всех зданиях неэксплуатируемая, совмещенная, неветилируемая с водоизоляционным рулонным покрытием.
2. Водоотвод с кровли внутренний, через водоприемные воронки.

Конструкция кровли по слоям была определена по результатам вскрытия шурфов (не менее четырех на каждой кровле).

Во всех обследованных зданиях ее конструкция по слоям идентична:

- кровельный рулонный материал;
- цементно-песчаная стяжка;
- слой теплоизоляции;
- пароизоляция;
- плоская железобетонная плита толщиной 120 мм.

Таблица 1

Перечень обследованных зданий, имеющих совмещенные кровли, в которых все слои последовательно уложены на несущую конструкцию

List of surveyed buildings with combined roofs, in which all layers are sequentially laid on a supporting structure

№ п/п	Адрес здания	Год постройки	Год проведения обследования	Срок эксплуатации на момент проведения обследования
1	г. Брест, ул. ГОБК, д. 72	1966	2021	55 лет
2	г. Брест, ул. Набережная, д. 36	1980	2023	43 года
3	г. Брест, ул. МОПРа, д. 8	1979	2022	43 года
4	г. Брест, ул. Дубровская, д. 10	1991	2022	31 год
5	г. Брест, ул. Дубровская, д. 10/1	1980	2022	42 года
6	г. Пружаны, ул. Кобринская, д. 63	1975	2017	42 года

Анализ результатов натурных исследований позволяет сделать следующий вывод. В совмещенных утепленных кровлях крупнопанельных жилых зданий, возведенных до 1980 г., применены засыпные утеплители (гравий керамзитовый, шлак топливный, газосиликат), которые и обеспечивают проектные уклоны к водоприемным воронкам. В зданиях, возведенных после 1980 г., слой теплоизоляции выполнен из газосиликатных блоков (плит). Уклоны в сторону водосточных воронок решены установкой подкладок под основание блоков.

Во всех обследованных зданиях кровля выполнена из 5–6-слоев наплавленного рулонного материала на битумной мастике, что свидетельствует о проведенном ранее капитальном ремонте (наклеены дополнительные слои) водоизоляционного ковра.

Все обследованные кровли имеют дефекты, оказывающие отрицательное влияние на их функциональную пригодность. Основными из них являются:

– потеря заводской защитной посыпки на отдельных участках водоизоляционного ковра (рис. 3); причина появления дефекта – длительное воздействие атмосферных факторов (перепад температур и влажности наружного воздуха) на рулонный материал;

– застой атмосферной воды на участках кровли (рис. 4); причина образования дефекта – локальные разрушения (размораживание) цементно-песчаной стяжки;

– вздутия между слоями кровельного рулонного ковра на отдельных участках кровли (рис. 5); причина – нарушение технологии выполнения кровельных работ.

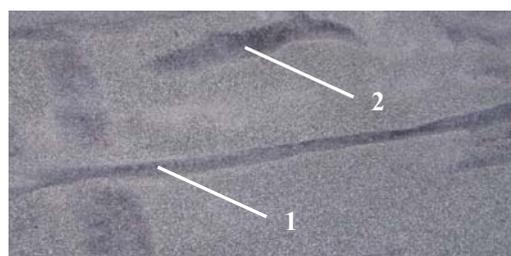


Рис. 3. Состояние верхнего слоя водоизоляционного рулонного ковра: 1 – верхний слой водоизоляционного рулонного ковра с разрушенной защитной заводской посыпкой; 2 – складки в верхнем слое водоизоляционного рулонного ковра

Fig. 3. Condition of the upper layer of the waterproofing roll-up carpet: 1 – top layer of a waterproof rolled carpet with a destroyed protective factory sprinkle; 2 – folds in the upper layer of the waterproof roll-up carpet



Рис. 4. Застой атмосферной воды на кровле
Fig. 4. Stagnation of atmospheric water on the roof



Рис. 5. Дефекты, вызванные нарушениями технологии выполнения кровельных работ: 1 – вздутия между слоями кровельного рулонного ковра; 2 – отслоения в местах нахлестки полотнищ

Fig. 5. Defects caused by violations of roofing technology: 1 – swelling between the layers of the roofing roll carpet; 2 – peeling in places of overlapping panels

Техническое состояние материалов конструктивных слоев вентилируемых (двухоболочковых) кровель

Как было отмечено ранее, такие кровли (рис. 2) в эксплуатируемых крупнопанельных жилых домах применены в небольших объемах ввиду высокой материало- и трудоемкости их возведения. В связи с этим оценка технического состояния конструктивных слоев эксплуатируемых кровель выполнена по результатам обследования двух объектов (табл. 2).

Таблица 2

Перечень обследованных зданий, имеющих вентилируемые кровли

List of surveyed buildings with ventilated roofs

№ п/п	Адрес здания	Год постройки	Год проведения обследования	Срок эксплуатации на момент проведения обследования
1	г. Барановичи, ул. Брестская, д. 287	1974	2022	48 лет
2	г. Барановичи, ул. Брестская, д. 289	1975	2022	47 лет

По результатам натурных исследований установлено:

1. Кровля во всех зданиях неэксплуатируемая, совмещенная, вентилируемая (двухоболочковая).

2. Вентиляция воздушной прослойки осуществляется за счет продухов (80×80 мм), выполненных в парапетной части наружных стеновых панелей с шагом 6 м. Состояние продухов удовлетворительное.

Конструкция кровли по слоям определена по результатам вскрытия шурфов (не менее пяти на каждой кровле). Установлено, что кровля состоит из следующих слоев:

- железобетонной плиты перекрытия толщиной 100 мм;
- пароизоляции (клеечная, один слой рубероида);
- теплоизоляции (слой гравия керамзитового);
- воздушной прослойки;
- плиты покрытия (80 мм);

- гравия керамзитового (для создания уклона);

- выравнивающей стяжки;

- водоизоляционного ковра (пять слоев наплавленного рулонного материала).

Отвод атмосферных вод с кровли осуществляется через водоприемные воронки. Проектные уклоны к водоприемным воронкам обеспечивает слой гравия керамзитового, уложенного по плите покрытия.

По результатам обследования кровель выявлены следующие дефекты, оказывающие отрицательное влияние на функциональную пригодность кровли здания в целом:

- застой атмосферной воды на участках кровли (водоизоляционный ковер имеет в отдельных местах «блюдца» глубиной до 20 мм); причина образования дефекта – локальные разрушения (размораживание) цементно-песчаной стяжки;

- локальные вздутия («воздушные мешки») рулонного ковра; причина – нарушения технологии производства работ.

- потеря заводской защитной посыпки основным водоизоляционным ковром; причина – длительное воздействие атмосферных факторов (перепад температур и влажности наружного воздуха) на рулонный материал.

Применение в крупнопанельных жилых зданиях сборных железобетонных плит покрытия размером на комнату позволяет за счет отсутствия межпанельных швов в несущей конструкции покрытия обеспечить удовлетворительное (работоспособное) состояние несущей конструкции покрытия, пароизоляции и материала утеплителя на длительный срок эксплуатации без дополнительных затрат. Следовательно, устройство вентилируемых кровель в крупнопанельных жилых зданиях нецелесообразно, что и подтвердили результаты исследований.

Анализ результатов натурных исследований эксплуатируемых длительное время (более 30 лет) совмещенных утепленных рулонных кровель крупнопанельных жилых зданий позволяет сделать следующие предварительные выводы.

Основными причинами появления и развития дефектов в верхнем слое водоизоляционного ковра являются:

1) физический износ водоизоляционного рулонного материала, обусловленный «жесткими» условиями эксплуатации кровли в целом и в первую очередь водоизоляционного ковра. Постоянное, в течение всего срока эксплуатации, влияние на верхний слой рулонного ковра различных сочетаний циклических атмосферных воздействий (перепад температур и влажности наружного воздуха, УФ излучения и др.) приводит к физическому износу водоизоляционного материала;

2) нарушения технологии производства кровельных работ, приводящие к появлению вздутий («воздушных мешков») между слоями кровельного рулонного ковра. Установлено, что этот дефект в процессе эксплуатации кровли приводит к появлению микротрещин в рулонном водоизоляционном материале, а затем и протечкам кровли [5];

3) локальные разрушения (размораживание) материала цементно-песчаной стяжки приводят к нарушению системы отвода атмосферных вод с кровли к водоприемным воронкам и застою ее на участках кровли (водоизоляционный ковер имеет в отдельных местах «блюдца» глубиной до 20 мм). При суточных перепадах температур наружного воздуха в межсезонный период происходит попеременное замораживание–оттаивание воды в «блюдцах», что приводит к возникновению дополнительных циклических растягивающих напряжений в водоизоляционном материале. Низкие прочностные характеристики битума при воздействии циклических силовых воздействий (напряжений растяжения) приводят к появлению микротрещин в рулонном водоизоляционном материале. При дальнейшей эксплуатации кровли происходит развитие микротрещин и, как следствие, в кровле возникают протечки.

Рекомендации по восстановлению эксплуатационных характеристик кровель крупнопанельных жилых зданий, возведенных в Беларуси до 1993 г.

Как показывает практика, основные затраты на устранение дефектов совмещенных утепленных рулонных кровель крупнопанельных

жилых зданий, эксплуатируемых более 30 лет, приходится на ремонт цементно-песчаной стяжки и конструктивно связанных с ней водоизоляционных материалов [1, 4]. Общее техническое состояние цементно-песчаной стяжки в этих кровлях характеризуется категорией III – не вполне удовлетворительное (ограниченно работоспособное) состояние. Очевидно, основной причиной локального разрушения стяжки являются следующие факторы. Крупнопанельные жилые здания, построенные до 1993 г., рассматривались как временные со сроком эксплуатации до 30 лет. С учетом этого срока эксплуатации и выполнялось проектирование стяжки: цементно-песчаный раствор повышенной жесткости (осадка конуса до 30 мм) марки 100, толщина 25 мм [10]. Основным требованием при проектировании цементно-песчаной стяжки было обеспечение ее прочности по морозостойкости на нормируемый срок эксплуатации крупнопанельных жилых здания, т.е. не менее чем на 30 лет. Учитывая, что нормируемый срок эксплуатации всех крупнопанельных жилых зданий, построенных до 1993 г., превышает 30 лет, объемы развития дефектов цементно-песчаной стяжки будут стремительно увеличиваться и проблема продления срока ее работоспособности будет приобретать все большую актуальность.

Очевидно, что эффективным решением продления срока эксплуатации цементно-песчаной стяжки без ее ремонта является полное исключение суточных циклов замораживания–оттаивания материала стяжки, т. е. выполнение ее утепления.

Анализ применяемых на практике конструктивно-технологических решений утепления совмещенных покрытий позволяет рекомендовать для решения этой задачи применить инверсионную кровлю [12]. Устройство такой кровли с водоизоляционным ковром из ПВХ-мембраны позволит обеспечить:

- снижение тепловых потерь совмещенных покрытий эксплуатируемых зданий;
- эксплуатацию водоизоляционного ковра без ремонта до 50 лет;
- рабочее состояние цементно-песчаной стяжки без ремонта на весь срок эксплуатации крупнопанельных жилых зданий старых типовых серий.

ВЫВОДЫ

1. Оценка технического состояния слоев кровель позволила установить, что основными дефектами, оказывающими отрицательное влияние на функциональную пригодность кровель зданий в целом, являются дефекты рулонного наплавленного покрытия кровли и цементно-песчаной стяжки.

2. Главными причинами появления и развития дефектов в основном водоизоляционном ковре являются физический износ рулонного материала на битумной мастике, обусловленный влиянием на него различных сочетаний циклических атмосферных воздействий: перепада температур и влажности наружного воздуха, УФ излучения и других, а также нарушения технологии производства кровельных работ.

3. Локальные разрушения цементно-песчаной стяжки обусловлены снижением ее морозостойкости. При проектировании крупнопанельных жилых зданий срок их эксплуатации планировался до 30 лет.

4. Предлагается при ремонте кровель крупнопанельных жилых зданий, построенных до 1993 г., применять инверсионную кровлю с водоизоляционным ковром из ПВХ-мембраны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еропов, Л. А. Особенности работы кровель из рулонных кровельных материалов и подходы к их выбору / Л. А. Еропов // Технические науки – от теории к практике. 2012. № 11. С. 74–78.
2. Зернов, А. Е. Надежность плоской кровли / А. Е. Зернов // Строительные материалы. 2006. № 5. С. 13.
3. Сиденко, Д. А. Долговечность плоских рулонных кровель / Д. А. Сиденко, В. Б. Белевич // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 8. С. 20–21.
4. Черноиван, В. Н. К оценке технического состояния эксплуатируемых совмещенных рулонных кровель / В. Н. Черноиван, С. Н. Леонович, Н. В. Черноиван // Строительная наука и техника. 2011. № 3. С. 47–51.
5. Черноиван, В. Н. Оценка эксплуатационной эффективности покрытия совмещенных утепленных рулонных кровель / В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван, А. В. Торхова // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 47–51.
6. Пилипенко, В. М. Анализ рынка жилищного строительства: ПРООН/ГЭФ Проект № 00077154 «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь» / В. М. Пилипенко. Минск, 2018. URL: <https://energoeffect.gov.by/effbuild/download/429.pdf>.

7. Плотников, В. В. Влияние конструктивных решений стыков крупных панелей на энергоэффективность зданий / В. В. Плотников, А. И. Голенок // Инновации в строительстве–2020: сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф., посв. 60-летию строительного института ФГБОУ ВО «БГИТУ», Брянск, 25 дек. 2020 г. Брянск: Брянский гос. инженерно-технологический ун-т, 2020. С. 235–239.
8. Варламова, Л. А. Герметизация крупнопанельных жилых домов / Л. А. Варламова, М. В. Рыноква // Теория и практика современной науки: материалы Междунар. (заочной) науч.-практ. конф., Минск, 8 июня 2017 г. Минск: Навуковы свет, 2017. С. 20–26.
9. Андрейко, И. В. Проблемы модернизации жилых домов 1950–70-х годов / И. В. Андрейко, Е. А. Кайдановская // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: сб. науч. ст., Гродно 21–22 мая 2020 г. Гродно: Гродненский госунар. ун-т им. Янки Купалы, 2020. С. 3–5.
10. Кровли: СН 5.08.01–2019. Введ. 08.09.20. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 29 с.
11. Общие положения по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений: СП 1.04.02-2022. Введ. 05.05.22. Мн.: Минстройархитектуры, 2022. 78 с.
12. Черноиван, В. Н. Предложения по реабилитации эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель / В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван, А. В. Торхова // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 1. С. 50–56. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-50-56>.

Поступила 10.12.2024

Подписана в печать 12.02.2025

Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Eropov L. A. (2012) Features of Roofing Made from Rolled Roofing Materials and Approaches to Their Selection. *Tekhnicheskie Nauki – ot Teorii k Praktike* [Technical Sciences – from Theory to Practice], (11), 74–78 (in Russian).
2. Zernov A. E. (2006) Reliability of a Flat Roof. *Stroitelnye Materialy = Construction Materials*, (5), 13 (in Russian).
3. Sidenko D. A., Belevich V. B. (2004) Durability of Flat Roll Roofs. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, (8), 20–21 (in Russian).
4. Chernouvan V. N., Leonovich S. N., Chernouvan N. V. (2011) To Assessment of Technjcal Condition of Operated Combined Roll Roofs. *Stroitelnaya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (3), 47–51 (in Russian).
5. Chernouvan V. N., Chernouvan N. V., Torkhova A. V. (2016) Evaluation of Operational Efficiency of Combined Insulated Roll Roofing Coatings. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, (1), 47–51 (in Russian).

6. Pilipenko V. M. (2018) *Analysis of the Housing Construction. UNDP/GEF. Project № 00077154 "Improving the Energy Efficiency of Residential Buildings in the Republic of Belarus"*. Minsk. Available at: <https://energoeffect.gov.by/effbuild/download/429.pdf>.
7. Plotnikov V. V., Golenok A. I. (2020) The Influence of Design Solutions for Joints of Large Panels on the Energy Efficiency of Buildings *Innovatsii v stroitel'stve–2020: sbornik dokladov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posv. 60-letiyu stroitel'nogo instituta FGBOU VO "BGITU", Bryansk, 25 dekabrya 2020 g.* [Innovations in Construction–2020: collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Construction Institute of the BGITU]. Bryansk, Bryansk State University of Engineering and Technology. 235–239 (in Russian).
8. Varlamova L. A., Rynkova M. V. (2017) Sealing of Large-Panel Residential Buildings. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki: materialy Mezhdunar. (zaochnoi) nauch.-prakt. konf., Minsk, 8 iyunya 2017 g.* [Theory and Practice of Modern Science: proceedings of the International (Correspondence) Scientific and Practical Conference]. Minsk, Navukovy svet Publ., 20–26 (in Russian).
9. Andreyko I. V., Kaydanovskaya E. A. (2020) Problems of Modernization of Residential Buildings Built in the 1950s-70s. *Tradicii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva: sbornik nauchnyh statei, Grodno 21–22 maya 2020 g.* [Traditions, Modern Problems and Prospects of Construction Development: Collection of Scientific articles]. Grodno, Yanka Kupala State University of Grodno, 3–5 (in Russian).
10. CN [Building Codes] 5.08.01–2019. *Roofings*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2020. 29 (in Russian).
11. CP [Building Rules] 1.04.02–2022. *General Provisions for the Inspection of Building Structures of Buildings and Constructions*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2022. 78 (in Russian).
12. Chernoi van V. N., Chernoi van N. V., Torkhova A. V. (2022) Proposals for Rehabilitation of Operated Combined Insulated Rolled Roofs. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 21 (1), 50–56. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-50-56> (in Russian).

Received: 10.12.2024

Accepted: 12.02.2025

Published online: 31.03.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-143-151>

UDC 629.331.03-83-592.3

Research on Truck Active Suspension Systems Effectiveness with Auxiliary Hydraulic Cylinders

Le Van Nghia¹, Tran Trong Dat¹, Dam Hoang Phuc¹, S. V. Kharytonchyk², V. A. Kusyak²

¹Hanoi University of Science and Technology (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The vehicle's body oscillation when traversing bumps not only causes driver discomfort but also negatively impacts the quality of the transported cargo. Consequently, numerous research studies have been conducted to improve suspension system characteristics with the goal of enhancing the vehicle's ride comfort and body stability. The majority of them have shown that equipping trucks with an active suspension is the most effective technical solution for ensuring comfortable working conditions for driver and cargo safety. This paper focuses on modeling and controlling an active suspension system for a truck in specialized simulation software, followed by evaluating its effectiveness compared to traditional passive suspension. In particular, the paper presents a quarter-vehicle suspension model integrated with an auxiliary hydraulic cylinder submodel controlled by a PID controller. The input parameters of the simulated suspension system were determined during full-scale experiments with real vehicles in laboratory and road conditions. To confirm the adequacy of the proposed mathematical model an experimental scenario was designed for measuring the vehicle body's oscillation parameters when traversing a step bump in the "passive" suspension control mode. After validating the model, the study proceeded to investigate the effectiveness of the active suspension system with the auxiliary hydraulic cylinder pressure PID control and compare the obtained results with the "passive" control option of the suspension system. The survey results indicate that the active suspension system, in conjunction with the PID control algorithm, significantly improves key performance metrics of the system. Specifically, the study found a reduction in oscillation damping time from 1.61 sec to 0.92 sec, a 16.7 % decrease in maximum amplitude of vehicle body oscillation and a substantial 61.5 % average reduction in vehicle body oscillation acceleration. On the other hand, in the active suspension system, the damping ratio also improved by about 5.8 % (from 0.260 to 0.245). These findings underscore the effectiveness of the active suspension system, as developed in this research, in enhancing the overall performance of the vehicle in terms of stability, safety, and ride comfort.

Keywords: truck, active suspension, auxiliary hydraulic cylinder, PID controller, 1/4 suspension model, mathematical modeling, semi-natural experiment, damping ratio, damping characteristics

For citation: Le Van Nghia, Tran Trong Dat, Dam Hoang Phuc, Kharytonchyk S. V., Kusyak V. A. (2025) Research on Truck Active Suspension Systems Effectiveness with Auxiliary Hydraulic Cylinders. *Science and Technique*. 24 (2), 143–151. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-143-151>

Исследование эффективности активной подвески грузового автомобиля со вспомогательными гидравлическими цилиндрами

Ле Ван Нгиа¹, Чан Чонг Дат¹, Дам Хоанг Пхук¹,
докт. техн. наук, доц. С. В. Харитончик², канд. техн. наук, доц. В. А. Кусяк²

¹Ханойский университет науки и технологий (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

²Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Колебания кузова автомобиля при преодолении неровностей дороги не только вызывают дискомфорт у водителя, но и негативно сказываются на качестве перевозимого груза. Многочисленные проведенные исследования,

Адрес для переписки

Чан Чонг Дат
Ханойский университет науки и технологий
ул. Дай Ко Вьет, 1,
100000, г. Ханой, Вьетнам
Тел.: +84 91 169-19-17
Dat.trantrong@hust.edu.vn

Address for correspondence

Tran Trong Dat
Hanoi University of Science and Technology
1, Dai Co Viet Street,
100000, Ha Noi, Viet Nam
Tel.: +84 91 169-19-17
Dat.trantrong@hust.edu.vn

направленные на улучшение характеристик систем поддрессирования с целью повышения комфорта езды и устойчивости кузова автомобиля, показали, что оснащение грузовых транспортных средств активной подвеской является наиболее эффективным техническим решением для обеспечения комфортных условий труда водителя и сохранности транспортируемого груза. В данной статье акцент сфокусирован на моделировании и управлении активной подвеской грузового автомобиля в специализированном программном обеспечении с последующей оценкой ее эффективности по сравнению с традиционной пассивной подвеской. В частности, в работе представлена четвертная модель подвески автомобиля с интегрированной субмоделью вспомогательного гидравлического цилиндра, управляемого посредством программного ПИД-регулятора. Входные параметры моделируемой системы поддрессирования определялись в ходе натурных экспериментов с реальными транспортными средствами в лабораторных и дорожных условиях. Для подтверждения адекватности предложенной математической модели разработан сценарий и проведен эксперимент по измерению параметров колебаний кузова при преодолении грузовым автомобилем неровностей в режиме «пассивного» управления подвеской. Валидация модели позволила в дальнейшем сфокусироваться на исследовании эффективности активной подвески с ПИД-регулированием давления в рабочей полости вспомогательного гидравлического цилиндра и сопоставлении полученных результатов с вариантом «пассивного» управления системой поддрессирования. Результаты исследования показали, что система активной подвески в сочетании с ПИД-алгоритмом управления давлением вспомогательного гидроцилиндра значительно улучшает оценочные показатели процесса затухания колебания кузова автомобиля. Так, время затухания колебаний кузова сокращается с 1,61 до 0,92 с, а максимальная амплитуда и среднее ускорение колебаний уменьшаются соответственно на 16,7 и 61,5 %. При этом коэффициент демпфирования системы уменьшается с 0,260 до 0,245 (приблизительно на 5,8 %), что в совокупности подтверждает эффективность разработанной в рамках данного исследования активной системы поддрессирования, а также способствует повышению общей производительности автомобиля с точки зрения устойчивости, безопасности и комфортабельности езды.

Ключевые слова: грузовой автомобиль, активная подвеска, вспомогательный гидроцилиндр, ПИД-регулятор, 1/4 модель подвески, математическое моделирование, полунатурный эксперимент, коэффициент демпфирования, характеристики затухания колебаний

Для цитирования: Исследование эффективности активной подвески грузового автомобиля со вспомогательными гидравлическими цилиндрами / Ле Ван Нгиа [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 143–151. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-143-151>

1. Introduction

The suspension system is a soft connection between the vehicle body and the wheels, responsible for ensuring a smooth ride for the driver, passengers, and cargo, transmitting vertical and horizontal forces from the wheels to the body and vice versa. Currently, with increasing demands for the smoothness of transported goods, active and passive suspension systems are being researched and developed into practical products [1, 2]. Among them, the active suspension system stands out in terms of both research trends and developments [3, 4].

An active suspension system can alter the forces exerted from the wheels to the vehicle body, thereby controlling the body's movement by adjusting the forces of the elastic and damping elements. Presently, several trends in active suspension systems include electronically controlled air suspension systems and electronic regenerative suspension systems.

Current research on active suspension focuses on optimizing suspension parameters to enhance driver, passenger, and cargo comfort. In Kumar's investigation [5] passive and active suspension

systems based on criteria such as ride comfort, suspension travel, and traction ability were compared. Additionally, research ideas for improving slip control have also been proposed by several publications [6–10]. In 2017, a study on limiting vertical acceleration to improve passenger and cargo comfort was published by Fabian León-Vargas and colleagues [11].

To achieve the forces acting on the vehicle body, various actuators have been studied for their effectiveness in active suspension systems. Several papers analyzing the performance of magnetorheological (MR) damper actuators indicate that MR dampers effectively absorb body vibrations and require low input power [12–14]. Besides MR fluid dampers, hydraulic actuators have also been extensively researched [15–18]. In one study, Y. M. Sam [19] simulated an active suspension system using hydraulic cylinders, demonstrating that this system significantly reduces body acceleration and displacement compared to passive suspension systems.

In recent years, many control methods for active suspension systems have been developed to optimize actuator performance. Studies on using Fuzzy Logic controllers to improve active suspen-

sion stability and flexibility were published in 2018 by Tiechao Wang and colleagues [20]. This method has also been used by researchers Hongyi Li and M. V. C. Rao in their studies [21, 22]. Additionally, PID controllers are widely used in active suspension control due to their simplicity and quick response to road surface irregularities [23–25]. Some researchers have combined two or more control methods to achieve the best results. In one of the articles [26] the authors combined PID and Fuzzy algorithms to demonstrate the active suspension effectiveness based on two criteria: body acceleration and wheel-body displacement.

This paper focuses on the evaluation of an active suspension system using a servo valve and hydraulic cylinders by simulation method [27–29]. The advantage of this actuator is its rapid response and individual installation for each wheel, ensuring continuous smoothness for the vehicle. After developing the mathematical equations, the passive suspension system is simulated using specialized simulation software. Real vehicle experiments were conducted to obtain input parameters for the simulation and verify the model. The hydraulic actuator was added to the verified model to develop the active suspension simulation. Subsequently, the research series under various scenarios was conducted to compare and evaluate the effectiveness of active and passive suspension systems according to three criteria: oscillation amplitude, oscillation acceleration, and damping time.

2. Research methodology and developing an active suspension system model

This paper analyzes the application of an active suspension system on a truck through simulation and investigation of a 1/4 suspension system's responses. The active suspension system model is built based on a passive suspension system model with the addition of a hydraulic cylinder to alter the force applied to the vehicle frame. Each control valve of the hydraulic cylinder is managed by a PID controller. The physical model of such 1/4 active suspension system is shown in Fig. 1. The operation of the system is represented and simulated by the set of mathematical equations (1) below. The active suspension system is modeled based on the passive suspension system with the

addition of force F_a generated by the hydraulic cylinder actuator. In the case of studying the passive suspension system for comparison, the force F_a is assigned a value of zero.

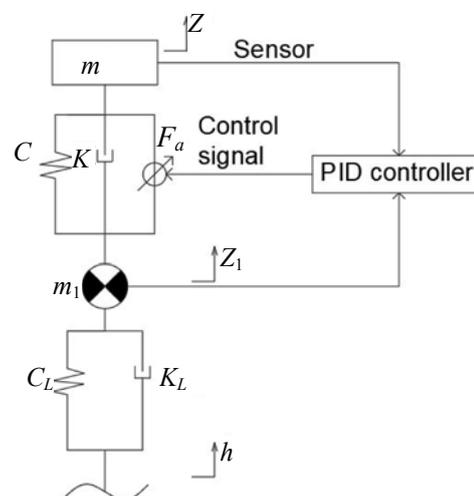


Fig. 1. Dynamic Diagram of the active suspension system

The active suspension model is described by the following mathematical equations:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{Z} &= F_C + F_K + F_a; \\
 m_1\ddot{Z}_1 &= (F_{CL} + F_{KL}) - (F_C + F_K + F_a); \\
 F_C &= C(Z_1 - Z); \\
 F_K &= K(\dot{Z}_1 - \dot{Z}); \\
 F_{CL} &= C_L(h - Z_1); \\
 F_{KL} &= K_L(\dot{h} - \dot{Z}_1),
 \end{aligned} \tag{1}$$

where m , m_1 – respectively sprung and unsprung mass, kg; F_a – hydraulic cylinder force of the hydraulic control system, N; F_C and C – force and stiffness of the elastic element, N and N/m; F_K and K – damping force and damping coefficient of shock absorber, N and Ns/m²; F_{CL} and C_L – force and stiffness of tire, N and N/m; F_{KL} and K_L – force and damping coefficient of tire, N and Ns/m²; h – road profile, m; \dot{h} – speed change of road profile, m/s; Z and Z_1 – displacement of the sprung and unsprung masses, m; \dot{Z} and \dot{Z}_1 – vertical speed of the sprung and unsprung masses, m/s; \ddot{Z} and \ddot{Z}_1 – acceleration of the sprung and unsprung masses, m/s². In this study, we utilize the parameters of a truck with the following

set of values: $m = 1300$ kg; $m_1 = 200$ kg; $C = 220000$ N/m; $C_L = 29000$ N/m; $K = 3500$ Ns/m²; $K_L = 3500$ Ns/m².

The mathematical model of the actuator system, that generates the force F_a has a structure as shown in Figure 2, which includes a force cylinder and a spool valve. The paper uses a pressure source assumed to be stable, generated by a high-pressure hydraulic pump P_v , supplied to the distribution valve. During operation, the distribution valve directs high-pressure hydraulic oil from the pump to the hydraulic cylinder chambers A and B . Distance sensors installed on the vehicle send signals regarding the displacement of the sprung mass and body roll angle to the controller. The controller then generates signals to control the servo valve displacement, thereby producing a force on the sprung mass due to the pressure difference between chambers A and B of the hydraulic cylinder.

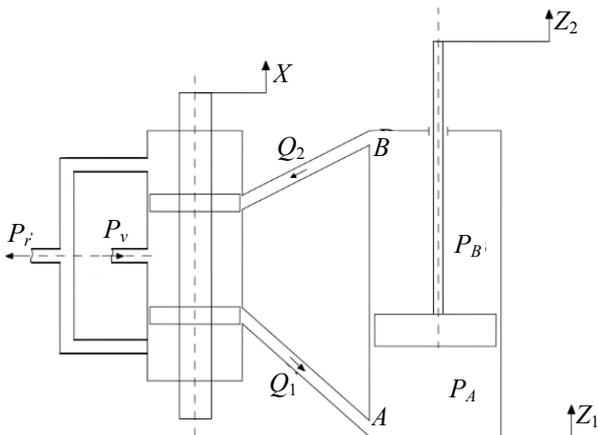


Fig. 2. Hydraulic control system model

When calculating and simulating the hydraulic system, this paper makes several assumptions, such as neglecting the fluid flow from chamber A to chamber B due to the gap between the piston and the cylinder (internal leakage), and the fluid flow from chambers A and B to the outside (external leakage) due to the non-absolute sealing of the cylinder structure. The initial pressure in chambers A and B is considered to be zero. With these assumptions, the equations for the pressures in chambers A and B of the cylinder are obtained as follows:

$$P_A = \frac{K_e}{V_A} \int (-(\dot{Z}_1 - \dot{Z})S_A + Q_1) dt; \quad (2)$$

$$P_B = \frac{K_e}{V_B} \int (-(\dot{Z}_1 - \dot{Z})S_B + Q_2) dt, \quad (3)$$

where V_A and V_B – A and B chamber's cylinder volume, m³; Q_1 and Q_2 – fluid flow rates into and out respectively A and B chambers, m³/s; \dot{Z}_1 and \dot{Z} – displacement's velocity of the unsprung and sprung masses, m/s; K_e – bulk modulus, Pa.

The equation for the fluid flow rate entering the force cylinder chambers is calculated by the formula:

$$Q = k_t X \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_v - \text{sign}(X)P_L)}, \quad (4)$$

where Q – flow rate into the chamber, m³/s; k_t – adjustable flow coefficient of the valve; P_v – pump pressure into the distribution valve, Pa; P_L – is the pressure in the piston chambers, Pa; X – the displacement of the distribution valve, m; ρ – liquid density, kg/m³.

However, the flow coefficient k_t is an adjustable variable and challenging to determine precisely. Therefore, the fluid flow rate is calculated using a proportional formula, where a certain displacement X_{dn} of the servo valve and the pressure difference ΔP_{dn} between chambers A and B will result in a flow rate Q_{dn}

$$Q_1 = Q_{dn} \frac{X}{X_{dn}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_{dn}}}. \quad (5)$$

Therefore, the force F_a generated by the hydraulic cylinder is determined as follows

$$F_a = P_B S_B - P_A S_A. \quad (6)$$

where S_A , S_B – piston's area on the side respectively without and with the piston rod, m² (Fig. 2).

As for the displacement $X < 0$ of the servo valve, the calculations follow similar steps as described above. In this study, the hydraulic parameters are calculated and selected as follows: $P_v = 10342500$ Pa; $S_a = 0.01$ m²; $\rho = 9000000$ kg/m³; $X_{dn} = 1$ mm; $V_A = V_B = 0.002$ m³.

Above presenting mathematical models of the hydraulic actuator and suspension system kinematics are simulated using MATLAB Simulink, which structures are depicted in Fig. 3.

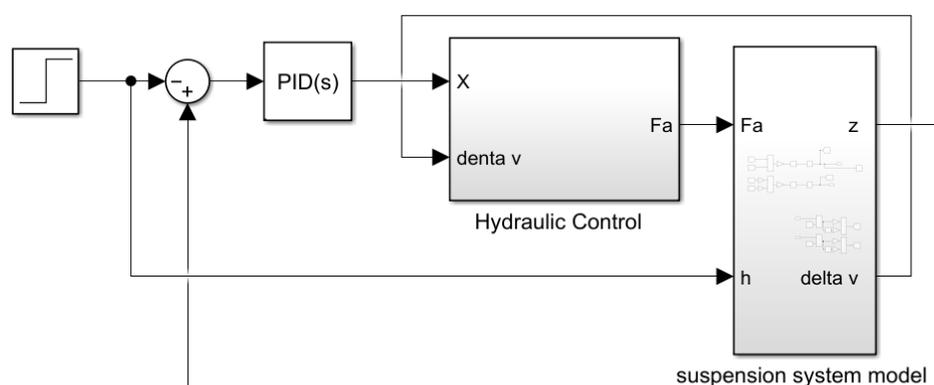


Fig. 3. Simulation model structures of an active suspension system

After simulating the mechanical system, we need to select a controller to control the displacement of the servo valve, providing input signals to the hydraulic control model. For the active suspension model in this study, achieving high precision in controlling the hydraulic actuator is essential. The PID controller is considered suitable and effective for the active suspension system due to its widespread use in closed-loop control systems (with feedback signals). The PID controller calculates the error value as the difference between the measured value of the variable parameter and the desired setpoint. It minimizes the error by adjusting the control input value. The feedback signal of the controller used in this study is the deviation between the vehicle body displacement and road irregularities. In practice, this parameter can be approximately interpolated from the distance between the vehicle body and the axle. The PID controller is designed with the following parameters: $k_P = 0.002$, $k_D = 0.002$, and $k_I = 0.026$. The controller output is then utilized to calculate the displacement of the hydraulic control valve.

3. Experimental procedure and simulation model validation

The purpose of the experiments is to determine the input parameters for the simulation model, specifically the damping coefficient, and to compare the simulated system model when the force exerted by the hydraulic cylinder is set to zero with the suspension system of a real vehicle under the same bumpy road conditions.

The characteristic of the real vehicle damper is determined by the test stand following Fig. 4 below.

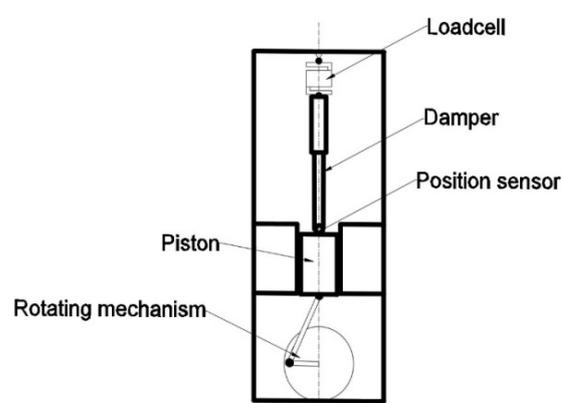


Fig. 4. Damper test stand

The system in Fig. 4 includes a drive mechanism that generates translational motion for the damper and sensors that measure damping force and the velocity of the damper's head. The damping characteristics obtained from these measurements are incorporated into the simulation model as input parameters. To validate the model, the paper utilized the experimental setup shown in Fig. 5. In this study, two HF sensors and one S-motion sensor from Kistler were used to measure the vehicle body displacement and acceleration as the vehicle moves over a 17.5 cm high step bump.

Due to the power limitation of the electric motor on the damper test stand, the experiment to determine the damping characteristics was only able to cover a small working area, as shown in Figure 6, where $v_k = \dot{Z}_1 - \dot{Z}$ is damper speed, m/s. The remaining working area of the damper (Fig. 7) was determined by interpolation based on the damping theory. The equivalent damping characteristics in Fig. 7 served as input for the previously developed quarter-car suspension simulation model.

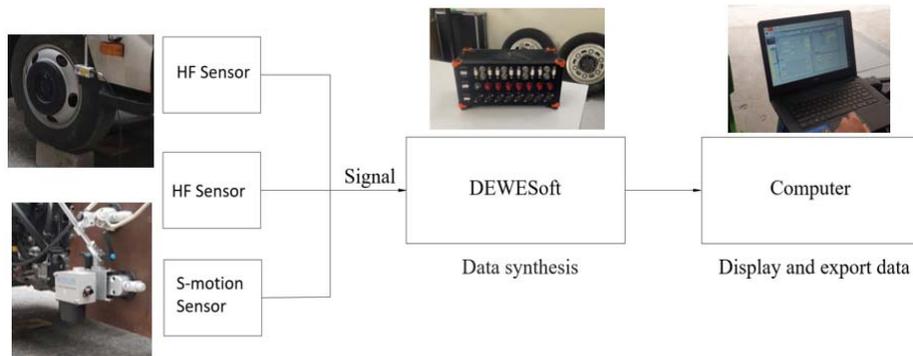


Fig. 5. Experimental configuration for determining the vehicle vibration

The paper validated the simulation model by comparing the experimental results of the passive suspension system on a real vehicle with the simulated passive suspension system model using the parameters obtained from the experiments (with no force applied from the hydraulic actuator). The results in Fig. 8 showed the amplitude values between the simulation and experiment differed by less than 10 % in general. Particularly, at the maximum oscillation amplitude, the deviation was only 0.61 %. The timing of peak values also showed close similarity, with the largest deviation being 7.7 %.

The simulated vehicle body acceleration in Fig. 9 closely matched the experimental results. Especially at the maximum acceleration (a_{max}), the deviation was only 0.82 %, indicating a high level of accuracy in the simulation. Through these comparisons, the simulation model closely approximated reality across three evaluation aspects: vehicle body displacement, body acceleration, and oscillation damping time, demonstrating the reliability of the constructed simulation model. Therefore, this simulation model can be effectively used in conjunction with the hydraulic control model to assess and evaluate the effectiveness of the active suspension system.

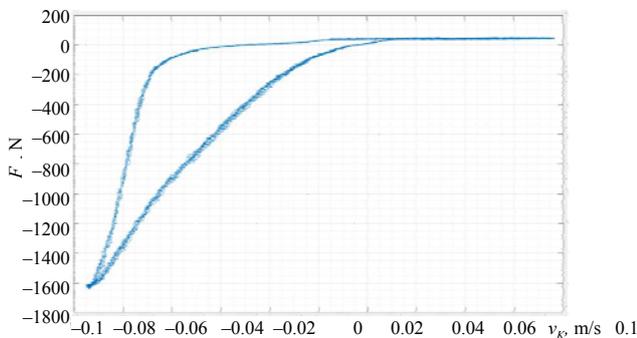


Fig. 6. Damping characteristics

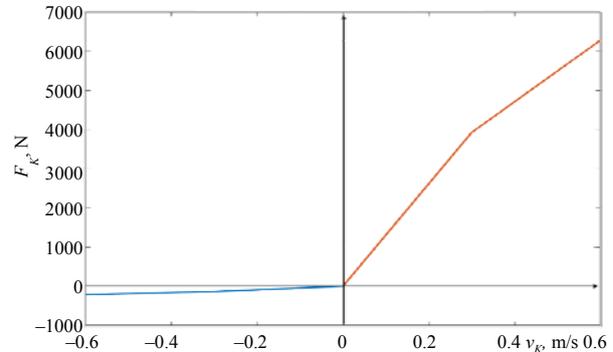


Fig. 7. Equivalent damping characteristics as input for simulation

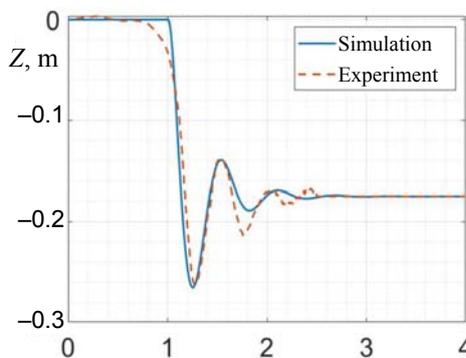


Fig. 8. Comparison of simulated and experimental displacement of the sprung mass in the passive suspension system

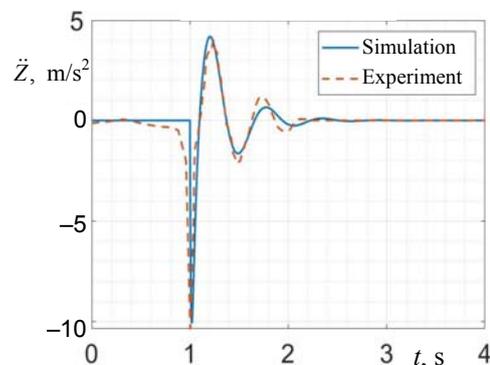


Fig. 9. Comparison of simulated and experimental vehicle body acceleration in the passive suspension system

4. Comparison and evaluation of active and passive suspension systems

After conducting comparisons to validate the simulation model, the paper proceeded to input experimental parameters into the active suspension system model. Simultaneously, the study determined the parameters for the PID controller. The results have indicated that the constructed active suspension system significantly optimizes vehicle body motion. Fig. 10 depicts the displacement of the vehicle body using active and passive suspension systems when passing through a 17.5 cm high step input. A_i represents the i^{th} peak of the vehicle body displacement, corresponding to time t_i . Amplitude values of vehicle body oscillation are shown in Table 1.

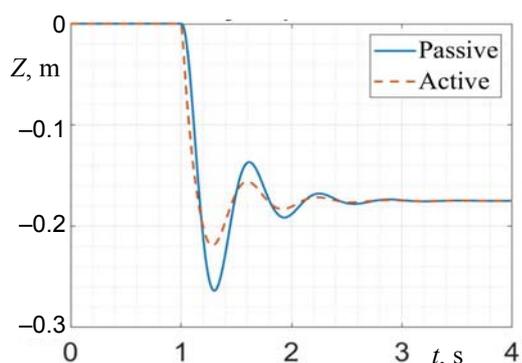


Fig. 10. Vehicle body displacement

Through simulation, it is observed that the active suspension system reduces oscillation amplitude by up to 16.7 %, particularly in the two largest oscillations. The damping time of oscillations also significantly improves, achieving 0.92 seconds compared to 1.63 seconds for the passive suspension system. From the above results, it is also possible to calculate the damping ratios, which are determined using the logarithmic decrement method, for the passive and active suspension systems. The received values – 0.260 and 0.245, respectively show the damping ratio reduction compared to the passive suspension system 5.8 %. This indicates that the active suspension system also enhances the vehicle body’s oscillation-damping capability. Therefore, this demonstrates that the active suspension system restores the

vehicle to a stable operating state more quickly compared to the passive suspension system.

Table 1
Amplitude values of vehicle body oscillation

i	Az_i_{active} (mm)	$Ai_{passive}$ (mm)	Reduction ratio compared to passive suspension system (%)
1	-219.1	-263.1	16.7
2	-155.9	-136.7	14.0
3	-183.1	-193.0	5.1

Fig. 11 shows the vehicle body acceleration when passing through a step input, comparing active and passive suspension systems. From the comparison Table 2, it is evident that the simulation model of the active suspension system greatly reduces vehicle body acceleration compared to the passive system. Particularly, for the first two maximum accelerations, vehicle body acceleration decreases by 45.2 and 77.8 %, respectively, compared to the passive suspension system. In conclusion, the received results show that the average reduction ratio of vehicle body acceleration is 61.5 % in comparison to the passive suspension system.

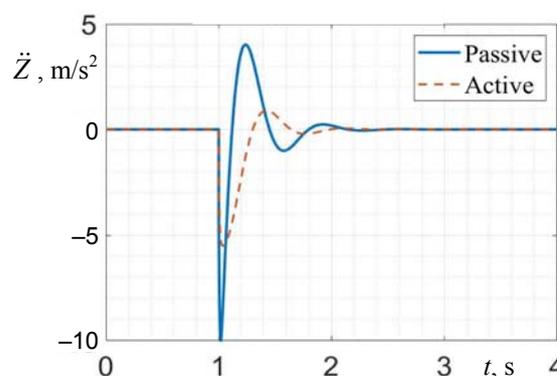


Fig. 11. Vehicle body acceleration

Table 2
Acceleration values of vehicle body oscillation

i	$a_{i_{active}}$ (m/s^2)	$a_{i_{passive}}$ (m/s^2)	Reduction ratio compared to passive suspension system (%)	Average reduction ratio compared to passive suspension system (%)
1	-5.49	-10.02	45.2	61.5
2	0.89	4.01	77.8	

CONCLUSION

In summary, the paper has successfully constructed dynamic models of both semi-passive and semi-active suspension systems. Using computer simulation software, the paper also simulated semi-passive with semi-active suspension systems, and validated the models against experimental results, thereby demonstrating the effectiveness of the active suspension system on trucks. In general, simulation results showed an error of less than 10 % across all three criteria: oscillation amplitude, oscillation acceleration, and damping time. Specifically, the high precision of the developed suspension model was confirmed at the pick points of the vehicle oscillation graph. This study has substantiated and evaluated the specific effectiveness of the active suspension system with high precision due to actual experimentation. The PID controller exhibited rapid computation and control capabilities, meeting the real-time demands of the suspension system. Moreover, the PID controller significantly improved the damping ratio (5.8 %), average acceleration (61.5 %), and maximum amplitude (16.7 %) compared to the passive suspension system. From this research, further developments could involve whole-vehicle simulations, replacement of PID controllers with other control systems, and standard stimulation for wheel response.

Funding: This research is funded by the Hanoi University of Science and Technology under project number T2023-PC-023.

REFERENCES

- Soliman A., Kaldas M. (2021) Semi-Active Suspension Systems From Research to Mass-Market – a Review. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40 (2), 1005–1023. <https://doi.org/10.1177/1461348419876392>.
- Riduan A.F.M., Tamaldin N., Sudrajat A., Ahmad F. (2018) Review on Active Suspension System. *SHS Web of Conferences*, 49, 02008. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184902008>.
- Karnopp D., Margolis D. (1984) Adaptive Suspension Concepts for Road Vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 13 (3), 45–160. <https://doi.org/10.1080/00423118408968772>.
- Mikhailau V. V., Snitkov A. G., Liahov S. V. (2016) Improvement of Bus Operational Characteristics While Using Integrated Control of Suspension and Transmission. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 15 (1), 37–45. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-37-45> (in Russian).
- Kumar M. S., Vijayarangan S. (2007) Analytical and Experimental Studies on Active Suspension System of Light Passenger Vehicle to Improve Ride Comfort. *Mechanic*, 65 (3), 34–41.
- Lin B., Su X., Li X. (2019) Fuzzy Sliding Mode Control for Active Suspension System with Proportional Differential Sliding Mode Observer. *Asian Journal of Control*, 21 (1), 264–276. <https://doi.org/10.1002/asjc.1882>.
- Chen S. A., Wang J. C., Yao M., Kim Y. B. (2017) Improved Optimal Sliding Mode Control for a Non-Linear Vehicle Active Suspension System. *Journal of Sound and Vibration*, 395, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.02.017>.
- Bai R., Guo D. (2018) Sliding Mode Control of the Active Suspension System with the Dynamics of a Hydraulic Actuator. *Complexity*, 2018, 5907208. <https://doi.org/10.1155/2018/5907208>.
- Deshpande V. S., Mohan B., Shendge P., Phadke S. (2014) Disturbance Observer-Based Sliding Mode Control of Active Suspension Systems. *Journal of Sound and Vibration*, 333 (11), 2281–2296. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.01.023>.
- Deshpande V. S., Bhaskara M., Phadke S. (2012) Sliding Mode Control of Active Suspension Systems Using a Disturbance Observer. *12th International Workshop on Variable Structure Systems*. IEEE, 70–75. <https://doi.org/10.1109/VSS.2012.6163480>.
- Leon-Vargas F., Garelli F., Zapateiro M. (2018) Limiting Vertical Acceleration for Ride Comfort in Active Suspension Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 232 (3), 223–232. <https://doi.org/10.1177/0959651817745469>.
- Karkoub M. A., Zribi M. (2006) Active/Semi-Active Suspension Control Using Magnetorheological Actuators. *International Journal of Systems Science*, 37 (1), 35–44. <https://doi.org/10.1080/00207720500436344>.
- East W., Turcotte J., Plante J. S., Julio G. (2021) Experimental Assessment of a Linear Actuator Driven by Magnetorheological Clutches for Automotive Active Suspensions. *Journal of intelligent Material Systems and Structures*, 32 (9), 955–970. <https://doi.org/10.1177/1045389X21991237>.
- Le V. N., Dam H. P., Tran T. D., Nguyen T. K., Kharytonchyk S. V., Kussyak V. A. (2024) Control Voltage Effect on Operational Characteristics of Vehicle Magnetorheological Damper. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 23 (5), 417–426. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-417-426>.
- Shen X., Peng H. (2003) Analysis of Active Suspension Systems with Hydraulic Actuators. *Proceedings of the 2003 IAVSD conference, Atsugi, Japan, August 2003*, 2 (2), 10.
- Liu Y. J., Zeng Q., Liu L., Tong S. (2018) An Adaptive Neural Network Controller for Active Suspension Systems with Hydraulic Actuator. *IEEE Transactions on Systems*,

- Man, and Cybernetics: Systems*, 50 (12), 5351–5360. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2018.2875187>.
17. Su X. (2017) Master–Slave Control For Active Suspension Systems with Hydraulic Actuator dynamics. *IEEE Access*, 5, 3612–3621. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2672598>.
 18. Rajamani R., Hedrick J. (1994) Performance of Active Automotive Suspensions with Hydraulic Actuators: Theory and Experiment. *IEEE, Proceedings of 1994 American Control Conference-ACC'94*, 2, 1214–1218. <https://doi.org/10.1109/acc.1994.752251>.
 19. Sam Y., Hudha K. (2006) Modelling and Force Tracking Control of Hydraulic Actuator for an Active Suspension system. *1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2006.257242>.
 20. Wang T., Li G. (2018) Adaptive Critic Optimal Fuzzy Control for Quarter-Car Suspension Systems. *5th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems (ICCSS)*, 440–444. <https://doi.org/10.1109/ICCSS.2018.8572428>.
 21. Li H., Liu H., Gao H., Shi P. (2011) Reliable Fuzzy Control for Active Suspension Systems with Actuator Delay and Fault. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20 (2), 342–357. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2011.2174244>.
 22. Rao M., Prahlad V. (1997) A Tunable Fuzzy Logic Controller for Vehicle-Active Suspension Systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 85 (1), 11–21. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00369-X](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00369-X).
 23. Ahmed A.E.N.S., Ali A. S., Ghazaly N. M., Abd el-Jaber G. (2015) PID Controller of Active Suspension System for a Quarter Car Model. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 8 (6), 899–909.
 24. Shafiei B. (2022) A Review on PID Control System Simulation of the Active Suspension System of a Quarter Car Model while Hitting Road Bumps. *Journal of The Institution of Engineers (India), Series C*, 103 (4), 1001–1011. <https://doi.org/10.1007/s40032-022-00821-z>.
 25. Talib M.H.A., Darns I.Z.M. (2013) Self-Tuning PID Controller for Active Suspension System with Hydraulic Actuator. *IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI)*. IEEE, 86–91. <https://doi.org/10.1109/ISCI.2013.6612381>.
 26. Mahmoodabadi M., Nejadkourki N. (2022) Optimal Fuzzy Adaptive Robust PID Control for an Active Suspension system. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20 (3), 681–691. <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1734154>.
 27. Zhilevich M. (2003) Calculation of Mobile Machine Oscillations in View of Internal Processes in Pneumohydraulic Suspension. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, (5), 46–52 (in Russian).
 28. Hurski N., Karami A. K. (2010) Modeling and Optimization of Vehicle Suspension Oscillations. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, (1), 44–47 (in Russian).
 29. Gao H., Jézéque L., Cabrol E., Vitry B. (2020) Robust Design of Suspension System with Polynomial Chaos Expansion and Machine Learning. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 19 (1), 43–54. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-1-43-54>.

Received: 18.10.2023

Accepted: 04.01.2024

Published online: 29.11.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-152-162>

УДК:338.4

MATE Analysis on the Study of Transportation Methods in Green Energy Trade

Li Jun ¹⁾, Wang Yaozhen ²⁾, M. K. Zhudro ¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The global significance of green energy in mitigating environmental damage has garnered substantial attention. However, recent indications suggest a less optimistic outlook for the social acceptance of green energy transportation (GET), accompanied by potential challenges and difficulties from various perspectives. Recognizing the urgency to address this issue and the current absence of a comprehensive overview of the knowledge structure in GET research and its determinants, there is a critical need for high-level insights. In response, this paper aims to provide a clear and accessible bibliometric analysis of GET research and its determinants using MATE (Multi-faceted Analysis of Textual Evidence) methodology. Firstly, employing various bibliometric analyses, the paper offers an in-depth examination of GET publications. This includes insights into active authors, highly productive countries/regions, prominent journals, citation structures, and the thematic evolution of GET. These analyses provide a visual representation of the current landscape of GET research. Secondly, complemented by content analysis, the paper categorizes and identifies key determinants of GET, encompassing technical considerations, adopter levels, corporate promotions, and environmental challenges. This comprehensive approach contributes to a nuanced understanding of the multifaceted factors influencing GET. Finally, the paper synthesizes the findings to highlight existing knowledge gaps and proposes potential future research directions in the realm of GET. By doing so, it equips scholars with a systematic knowledge base and a well-structured comprehension of GET research and its determinants. This research, guided by MATE analysis, serves as a valuable resource to navigate the complexities of GET, facilitating informed decision-making and fostering further exploration in this crucial field.

Keywords: energy economics, MATE analysis, Energy transportation

For citation: Jun Li, Yaozhen Wang, Zhudro M. K. (2025) MATE Analysis on the Study of Transportation Methods in Green Energy Trade. *Science and Technique*. 24 (2), 152–162. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-152-162> (in Russian)

Анализ МАТЕ по изучению методов транспортировки в торговле «зеленой» энергией

Ли Цзюнь ¹⁾, Ван Яожэнь ²⁾, М. К. Жудро ¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Глобальное значение «зеленой» энергетики в снижении ущерба окружающей среде привлекает значительное внимание. Однако последние признаки свидетельствуют о менее оптимистичных перспективах общественного признания «зеленого» транспорта (GET), сопровождаемых потенциальными проблемами и трудностями с различных

Адрес для переписки

Жудро Михаил Кириллович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-06
eut_atf@bntu.by

Address for correspondence

Zhudro Mihail K.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-06
eut_atf@bntu.by

точек зрения. Признавая неотложность решения этой проблемы и отсутствие в настоящее время всеобъемлющего обзора структуры знаний в области исследований GET и определяющих ее факторов, существует острая потребность в анализе на высоком уровне. В ответ на это данная статья ставит своей целью предоставить четкий и доступный библиометрический анализ исследований GET и определяющих их факторов с использованием методологии MATE (многогранный анализ текстовых свидетельств). Во-первых, используя различные библиометрические анализы, в работе предлагается углубленное изучение публикаций GET. Это включает в себя анализ активных авторов, высокопродуктивных стран/регионов, известных журналов, структуры цитирования и тематической эволюции GET. Эти анализы дают наглядное представление о текущем ландшафте исследований GET. Во-вторых, дополненный контент-анализом, документ классифицирует и определяет ключевые факторы, определяющие GET, включая технические соображения, уровни внедрения, корпоративные акции и экологические проблемы. Такой комплексный подход способствует более глубокому пониманию многогранных факторов, влияющих на GET. Наконец, в статье обобщаются полученные результаты, чтобы подчеркнуть существующие пробелы в знаниях и предложить потенциальные направления будущих исследований в области GET. Таким образом, ученые получают систематизированную базу знаний и хорошо структурированное представление об исследованиях GET и их детерминантах. Данное исследование, проведенное на основе MATE-анализа, служит ценным ресурсом для навигации по сложностям GET, способствуя принятию обоснованных решений и дальнейшим исследованиям в этой важной области.

Ключевые слова: экономика энергетики, MATE-анализ, транспортировка энергии

Для цитирования: Цзюнь Ли. Анализ MATE по изучению методов транспортировки в торговле «зеленой» энергией / Ли Цзюнь, Ван Яожэнь, М. К. Жудро // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 152–162. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-152-162>

Introduction

The accessibility, acceptability, and affordability of energy play pivotal roles in the comprehensive economic development of regions and countries [1]. Despite this, the escalating global demand for fossil fuels exerts substantial pressure on energy markets. Furthermore, the predominant use of fossil fuels is a major contributor to greenhouse gas emissions, prompting scholars worldwide to emphasize the urgent need for countries to reduce emissions or face potential catastrophic consequences of climate change [2].

In response to this global challenge, there is a consensus among scholars that transitioning to green energy represents an effective strategy [6]. Green energy, as defined by Zarnikau [3], involves electricity generated from renewable sources such as photovoltaic solar panels, biomass projects, geothermal projects, and wind farms. The transportation of green energy holds the promise of achieving zero pollutants and direct applicability in both industrial production and daily life.

Amid the global call for increased use of clean and renewable energy to combat climate change [4], many countries, as evidenced by the 2019 UN Climate Summit, have committed to achieving net-zero CO₂ emissions by 2050 [5]. This has spurred global efforts to accelerate the transportation of green energy resources and mitigate carbon emissions from traditional energy use [6]. Despite significant research findings over the past two decades contributing to the understanding of Green Energy Trans-

portation (GET), the current public uptake of green energy appears insufficient (Table 1).

Table 1

Statistical tables on energy economy and transportation

Year	Energy Production (Million kWh)	Energy Consumption (Million kWh)	Energy Imports (Million kWh)	Average Oil Price (per barrel in USD)	CO ₂ Emissions from Transportation Sector (Million Tons)
2015	8000	7000	2000	60	120
2016	8200	7200	2100	55	118
2017	8500	7500	2200	50	115
2018	8800	7800	2300	65	112
2019	9000	8000	2400	70	110
2020	9200	8200	2500	45	108
2021	9400	8400	2600	40	105
2022	9600	8600	2700	55	103
2023	9800	8800	2800	60	100
2024	10000	9000	2900	65	98

Addressing this gap, numerous studies have explored factors influencing GET at individual, corporate, and societal levels [7]. With evolving research methods and increased data availability, scholars are turning to empirical research designs to investigate the determinants of GET. However, the growing but fragmented literature on GET necessitates a high-level and complete evaluation of the current state of research.

This article is guided by MATE analysis and focuses on the transportation methods in green energy trade, aiming to provide a comprehensive bibliometric review of GET research and its determining factors. Through performance analysis, scientific mapping techniques, and cluster analysis, this study provides a detailed understanding of GET research, identifies key determining factors, and explores knowledge gaps and future research directions. Using tools such as CiteSpace, VOSviewer, and Bibliometrix, and extracting data from the Web of Science Core Collection (WoS), three main objectives were achieved: (1) investigating the knowledge landscape of GET publications, (2) identifying the influencing factors of GET, and (3) determining potential directions for future research. The contribution of this article lies in its use of bibliometric methods to describe the evolution and current status of GET research, providing more relevant and reliable statistical analysis. A unique review and summary of the determinants of GET from multiple perspectives has been conducted, filling the gap in existing literature. The conclusion of the article will delve into the materials and methods, visualize the knowledge field of GET research, identify key determining factors, and summarize the impact and future research directions.

Materials and methodology

The objective of this study is to systematically trace and analyze the ongoing research activities

and dynamics in the field of Green Energy Transportation (GET) while shedding light on its determinants. To address this objective, a comprehensive bibliometric review is conducted, encompassing both performance analysis and science mapping. The initial phase of the study involves a thorough examination of the GET literature through performance analysis and visualization techniques, employing science mapping tools. Subsequently, the focus shifts to a meticulous review of literature specifically addressing the determinants of GET. An in-depth qualitative analysis is carried out using clustering functions facilitated by CiteSpace (Fig. 1).

Fig. 2 illustrates the research framework used in this study, elucidates the methodology for generalization, and points out the interrelated steps taken to explore and analyze the complex dynamics of GET and its determinants.

The literature data collection for this article was conducted in the core collection of the Web of Science (WoS) database. WoS, recognized for its comprehensive and multidisciplinary citation data, has emerged as a prominent data source for bibliometric analyses [8]. This platform facilitates researchers in obtaining extensive bibliographic data from reputable journals [9]. Following the selection of WoS as the database, a meticulous collection strategy was devised, aligning with the research framework.

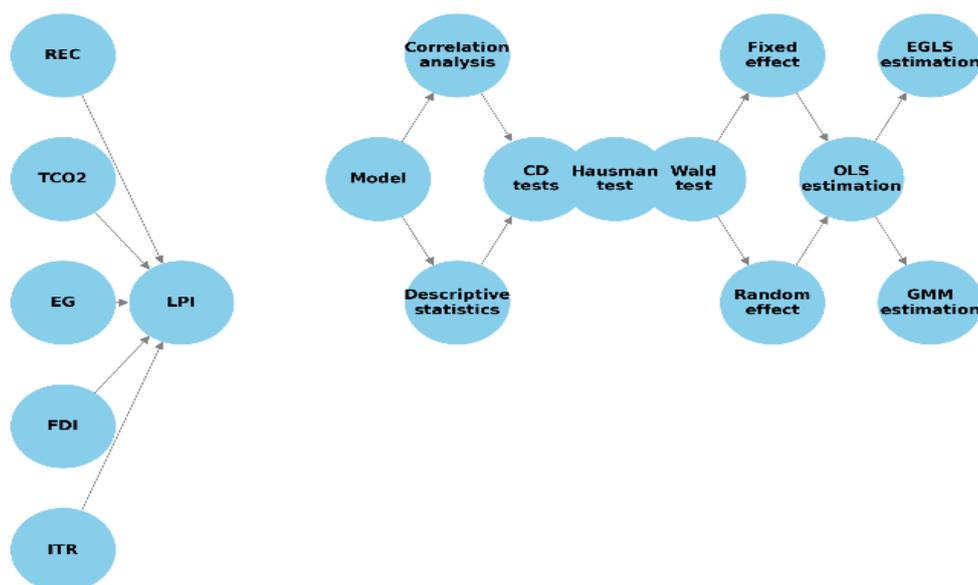


Fig. 1. Conceptual model and estimation procedure of this study

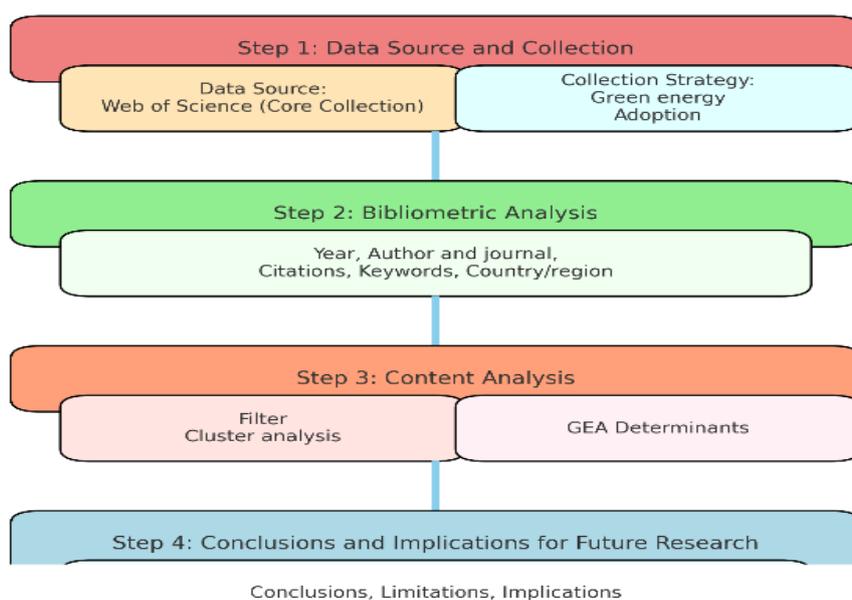


Fig. 2. The research framework of the MATE

The search process unfolded in three key steps. In the initial step, the terms “green energy” and “transportation” were employed to delineate the boundaries of the study field. Subsequently, these defined terms, along with the appropriate Boolean operators and retrieval types, were intricately combined to construct the final query: Topic = “green energy” AND Topic = “transportation”. The literature data retrieval occurred on October 6, 2020, resulting in a total of 1007 publication records. In the subsequent step, data preprocessing was undertaken. To address duplicate information in the original dataset, the bibliometric tool CiteSpace [10] was employed for the removal of duplicated data. Additionally, essential manual checks and evaluations were conducted for each publication to ensure its relevance to the Green Energy Transportation (GET) domain. Consequently, 741 screened journal articles were identified as pertinent to the study.

The bibliometric data extracted from WoS proved to be a valuable resource, offering information such as cited references, keywords, and bibliographical details [11]. This comprehensive approach to literature data collection ensures a robust foundation for the subsequent MATE (Multi-faceted Analysis of Textual Evidence) analysis, providing a nuanced understanding of transportation methods in the realm of green energy trade.

Intellectual landscape of GET publications

Within this section, we delineate the intellectual landscape of Green Energy Transportation (GET) publications, presenting a spatial depiction through five key components. The exploration covers insightful results and findings related to publication years, authors and journals, countries/regions, citations, and keywords. Consequently, this comprehensive analysis unveils and visualizes the fields of research interests, considerations, and trends within the GET scientific community. The synthesis of this information provides a comprehensive understanding of the constantly changing landscape and highlights the dynamic aspects shaping the discourse of transportation methods in the field of green energy trade.

Fig. 3 shows the temporal trend of green energy transportation (GET) research based on total publications (TP), total citations (TC), and average citations per publication (AC). The publications arranged in chronological order show that the first document on GET was published in 1994, in which Heyes advocated for the development of environmental hazard policies on a hazard by hazard basis to address significant impacts on all sectors of the European energy sector. This early work emphasized the necessity of addressing environmental damage issues and laid the foundation for subsequent research in the GET field.

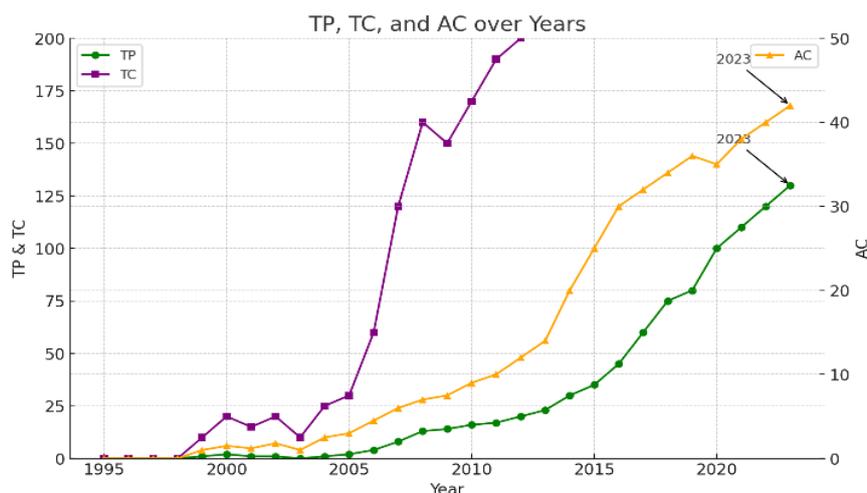


Fig. 3. The distribution trends of TP, TC, and AC about GET publications

From the mid-1990s to around 2010, GET research was still relatively limited. However, the urgency of GET is becoming increasingly apparent, leading to a surge in research activities. According to research, the number of GET publications has increased significantly every year from 2010 to 2020, reaching a peak of 175 papers in 2019. This significant growth can be attributed to the academic attention caused by the growing environmental issues in the energy industry.

As shown in Fig. 3, the annual citation structure (TC) of GET publications is similar to the trend of TP. It can be seen that there has been a sharp upward trend, especially since around 2010. The increase in citations can be attributed to the continuous increase in the number of relevant publications during this period, indicating a significant amount of valuable academic contributions. The analysis of the average citation count (AC) per publication shows that the citation count has steadily increased since 2009. It is worth noting that the AC value reached 15.5 in 2005, despite only two documents being released that year. This anomalous phenomenon indicates that despite the limited number of publications, the impact and influence of this work are enormous, emphasizing the importance of early contributions to GET research.

The development and progress of any discipline inherently depend on the collaborative efforts of different scholars. Through bibliometric analysis, 3009 authors who have contributed to the field of green energy trade and transportation methods were identified from 1007 articles. Fig. 4 visually illustrates the contributors in the field by display-

ing their collaborative networks and respective publication numbers.

In constructing the author collaboration network, a minimum threshold of one document per author was set, and the top 1000 authors with the highest total link strength were selected. The resulting simplified author collaboration network, portrays nodes representing different authors, while links convey the exact status of co-authorship relations among them. Overall, a sparsely connected cooperation network structure emerges, reflecting the collaborative dynamics in this research domain [12].

To gain a more nuanced view of the most active authors within this collaboration network, an analysis was focused on the largest set of connected networks comprising 13 authors. Within this closely-knit cooperation network, authors are divided into four research communities, each marked with diverse colors. Darko Amos from the Hong Kong Polytechnic University of China emerges as the most active author, leading in both the number of publications contributed and the strength of cooperation relations. Amos has authored nine high-quality articles, establishing significant influence in collaborations related to Green Energy Transportation (GET). His dedicated research focuses on strategies for green building and energy transportation in the construction industry.

Following closely, the second most productive author is Adnan Nadia from Universiti Teknologi Petronas in Malaysia, contributing six articles. Nadia's research interests primarily revolve around green agriculture and energy technology transportation.

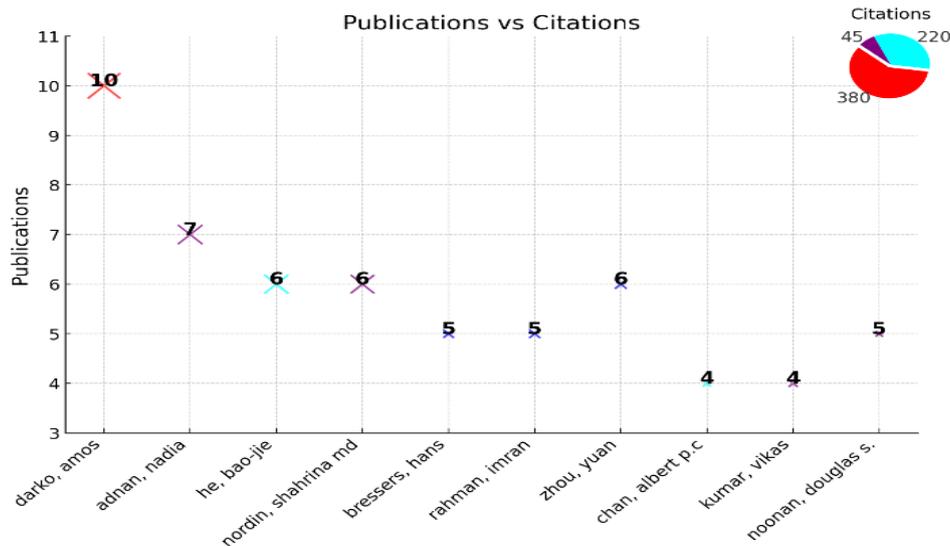


Fig. 4. GET publications by authors and author collaboration networks

Notably, the largest research community, marked with the color red, exhibits limited connections and relationships with Darko Amos, with only one direct cooperation path established. This intricate author collaboration network sheds light on the interconnections and collaborative dynamics among scholars contributing to the study of transportation methods in green energy trade.

Moreover, it provides a temporal overlay of the author collaboration map, linking authors to publications and facilitating an exploration of the evolution of active authors over time. Darker nodes indicate influential authors in earlier years, while lighter shadows represent influential authors in more recent literature. Between 2005 and 2020, two major research communities emerge, one with an average publication year in 2006 and the other in 2018. The denser left community suggests stronger collaboration between authors in the early years compared to recent years. Limited collaboration is observed between authors from these two groups, with researcher White Robin J acting as a mediator, ensuring continuity in the study.

In the final analysis, a total citation analysis for the top 10 high-yield authors is presented in Fig. 4, where the circle's area represents the number of citations. Darko Amos and Adnan Nadia lead, followed by He Bao-Jie and Nordin Shahrina Md, both with six articles. Bressers Hans, Rahman Imran, and Zhou Yuan follow with five articles each, while three authors contribute four equal ar-

ticles. Interestingly, the number of citations does not necessarily correlate with the number of publications, exemplified by Chan Albert P. C. from Hong Kong Polytechnic University, who has the second-highest total citations (192) with only four articles authored. This emphasizes that authoritative scholars often influence the conceptual and methodological trends in research domains, generating highly cited articles.

To uncover key schools of thought and the emerging intellectual structure of the Green Energy Transportation (GET) knowledge base, the authors' co-citation network is applied. Fig. 5, depicting the outcome of this analysis, showcases the co-cited authors with a threshold of 20 citations per author. The size of the colored sphere represents the number of citations per author. Notably, Ajzen I stands out as highly correlated with GET studies, evident from both the size of the sphere and its strategic position in the graph. Fig. 5 analysis identifies five distinct but interconnected schools of thought within the GET domain, with each school featuring outstanding core authors who are strongly connected. For instance, in the largest school of thought (in red), Ajzen I is closely linked to other highly cited authors such as Stern PC (115 citations), Rogers EM (121 citations), and Steg I (81 citations). Ajzen I's extensive co-citation across multiple schools of thought positions him as a "boundaryspanning scholar", integrating diverse conceptual streams or knowledge flows within this knowledge domain.

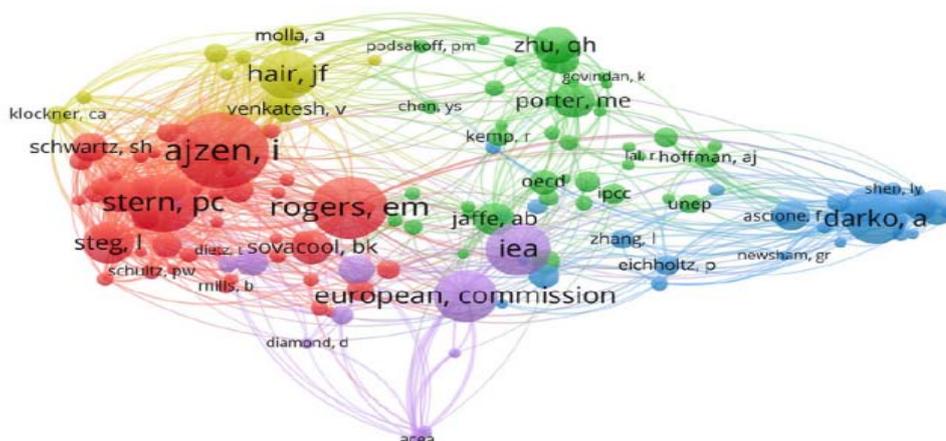


Fig. 5. The co-citation network of authors regarding GET publications

Another noteworthy discovery involves the identification of leading journals in the field of Green Energy Transportation (GET). It consolidates the top 10 most prolific journals in GET research. Notably, the Journal of Cleaner Production emerges as the most active journal in GET research, having published a total of 84 articles to date. Following closely is Energy Policy, ranking second with 65 articles, succeeded by Sustainability [13], Renewable Energy Reviews [14], and Energy and Buildings [15], among others. These highly productive journals are characterized by elevated impact factors. For instance, the Journal of Cleaner Production achieved an impact factor of 9.297 in 2020, and Renewable and Sustainable Energy Reviews reached an impressive 14.982.

It illustrates the journal co-citation network, aimed at categorizing journals based on different themes and identifying core journals within each category. Setting the minimum citation threshold for a source at 20, a total of 318 journals meet this criterion. These journals play a pivotal role in shaping the landscape of GET research. The top three most frequently cited journals are Energy Policy (2715 citations), Journal of Cleaner Production (1830 citations), and Renewable and Sustainable Energy Reviews (1252 citations). These leading journals, distinguished by three different colors, signify their unique research directions. Additionally, other significant journals such as Science, Nature, and Building and Environment also contribute substantially, it delineates the quality level of publications for each journal, offering valuable insights for novice researchers to quickly understand the distribution of high-quality journals in the GET field.

Turning our attention to the international collaborations between influential countries/regions, it provides a comprehensive overview. Specifically, Fig. 6 offers a detailed representation of the country/region collaboration map. It is noteworthy that the establishment of lines between countries/regions signifies cooperative relationships, and the thickness of the link directly reflects the level of cooperation. The USA stands out with the broadest spectrum of cooperative partners, prominently featuring China. Additionally, China, England, and Australia exhibit robust collaborative ties with various countries/regions. Evidently, a clear inclination towards international collaboration is observed in the four high-yield countries. This preference is substantiated by the superior performance of internationally co-authored papers in terms of both quantity and citations. Italy, ranking fourth with 76 published articles, maintains a relatively closed posture, with limited communication with the international community. A similar situation is observed in India. Fig. 6 to address this challenge, scholars from Italy and India should proactively enhance academic visits and engage in international research exchanges.

Utilizing the clustering algorithm in VOSviewer, these diverse countries/regions are further categorized into nine distinct groups. Unsurprisingly, the USA, China, and England emerge as the three most prominent nodes in the diagram, maintaining substantial connections with each other. However, these three countries do not belong to the same category and are labeled with three different colors. Consequently, geographic location exerts influence on the research orientation in different countries/regions to a certain extent. Scholars worldwide should dismantle spatial barriers in GET research and expedite the vibrant development of this field.



Fig. 6. The country/region collaboration map at the geographic level

To unravel the internal structure of the citation network in the realm of Green Energy Transportation (GET) research, the reference relationships among publications are meticulously examined using VOSviewer software. Employing a minimum threshold value of 10, ensuring that each document has no fewer than 10 citations, a GET citation network comprising 373 documents is identified. However, for the sake of focus, only the most extensive set of interconnected documents is considered, resulting in a citation network featuring 147 nodes and 281 links. Leveraging the clustering algorithm embedded in VOSviewer, 14 distinct categories are delineated, with the largest category highlighted in red and encompassing 17 documents.

In the context of the citation network presented in the figure, the most frequently cited node is Menanteau (2003), boasting 399 citations. Menanteau's seminal work, a journal article published in *Energy Policy* in 2003 titled "Prices versus quantities: choosing policies for promoting the development of renewable energy", asserts the efficiency of the feed-in tariff system compared to the competitive bidding system. It underscores the theoretical advantages of green certificate trading, subject to confirmation through practical implementation, considering the impact of market structure and rules on the execution of green certificate trading. This research stands as pioneering work in the GET field. Subsequently, Hartmann (2012) follows with 265 citations, revealing that advertising campaigns targeting increased consumer demand for green energy should encompass not only

environmental and utilitarian benefits but also psychological brand benefits.

It is important to note that some highly cited papers may not appear in the figure due to specific parameters set during network generation. Therefore, Table 1 details the top 10 most highly cited articles, while lists the top 10 key cited articles in chronological order. Notably, the article authored by Menanteau et al. not only garners a substantial number of citations but also holds significance in the GET domain. Consequently, scholars focusing on GET should accord due attention to this influential publication. Regarding publication sources, *Energy Policy* emerges as the most frequently cited journal, indicating its substantial contributions to the field's development. The LCS metric underscores the importance of the article titled "Overcoming the social and psychological barriers to green building", authored by Hoffman and Henn, in shaping the chronological citation network, having been cited 21 times to date.

To gain insights into the thematic landscape of Green Energy Transportation (GET) research, an in-depth analysis of keywords is conducted, utilizing a word cloud generated from both author keywords and keywords plus in the Web of Science (WoS) database. Author keywords offer insights into the issues and author preferences, while keywords plus, being equally effective for bibliometric analysis, prove advantageous in capturing the scientific concept of articles. It presents a visual representation of the top 50 words from both author keywords and keywords plus.

The word cloud highlights “transportation” at the center, followed by “green” and “energy”, with additional frequently used terms like “performance”, “barriers”, and “policy”. Conversely, it reveals that “sustainability” takes center stage, closely followed by “renewable energy” and “sustainable development”. Notably, keywords plus exhibit a broader scope compared to author keywords, as evidenced by the inclusion of “sustainability” and “renewable energy” in both representations. This underscores the superiority of keywords plus in offering a comprehensive bibliometric analysis of scientific field structures.

Moving beyond individual keywords, the co-occurrence network structure for all keywords is examined. After filtering for a minimum of 20 occurrences, 56 keywords are identified and categorized into three distinct clusters. The red cluster focuses on factors influencing the transportation of green energy, the green cluster centers on application strategies and performance measurement of green energy, while the blue cluster emphasizes environmental management, encompassing terms like ‘energy efficiency’, “management”, and “barriers”.

Turning attention to the temporal thematic evolution of GET research, a Sankey diagram, specifically a Sankey energy difffluence diagram, is employed to illustrate how different themes interact over decades. Each block represents a theme, its length proportional to the number of associated keywords, and the links depict thematic evolution over sub-periods. The connecting lines' thickness indicates the strength of linkage between themes, and colors distinguish various research themes.

Fig. 7 the diagram reveals a substantial number of connections and intensive relationships in the evolution of themes, with closer connections observed over time.

The thematic evolution analysis demonstrates some themes that have been steadily inherited and developed, such as “transportation”, which grew compactly from 2009 to 2012 until the period 2017–2020. Additionally, newer themes like “perceived consumer effectiveness” and “quality” emerged between 2013 and 2016 but swiftly evolved into established concepts by 2017–2020. Notably, certain themes, like “energy”, exhibited significant growth in research frequency, indicating the dynamic and evolving nature of GET studies. Overall, the findings suggest that research in the GET domain is in its early stages, characterized by continual transfer, differentiation, and regeneration among diverse themes, indicating a sunrise phase rather than maturity.

Results and discussion

Export diagnostics of complementarity of the SMART in-dustry of Belarus and China in the broader context of Green Energy Transportation (GET) research, several notable characteristics and trends emerge [16]. Firstly, a temporal division reveals two distinct phases in GET studies: the period preceding 2010 marked by relatively sluggish activity, and the post-2010 era witnessing a surge in interest, with researchers increasingly focusing on this domain due to heightened concerns surrounding climate change and environmental pollution resulting from energy consumption.

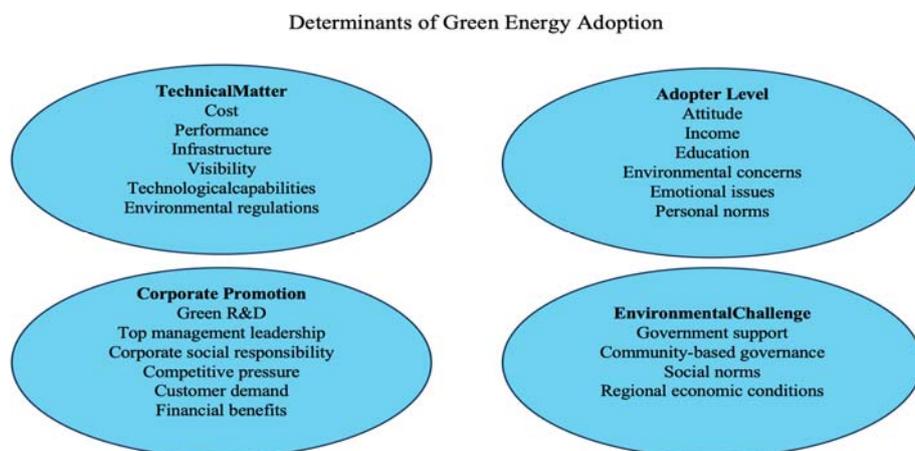


Fig. 7. Highlights of the four themes of the GET with their respective determinants

Secondly, an authorship analysis highlights Darko Amos as a key figure, displaying exceptional activity in terms of publications, citations, and impact on the collaboration network. White Robin J contributes significantly to research continuity. However, a comprehensive view indicates a lower level of collaboration among consistently productive authors in the GET field.

Thirdly, examining journals reveals the Journal of Cleaner Production as a leader in production throughout the observation period. This, along with Renewable and Sustainable Energy Reviews and Energy Policy, forms a triumvirate of major contributors to scientific production in the GET field.

Fourthly, the distribution of research articles across countries and regions identifies the USA, China, and England as the primary generators of GET research. These nations exert substantial influence in the field, yet despite close cooperative relations, a persistent geographical divide hampers the overall research capacity in GET.

Fifthly, the study delves into influential publications through citation network analysis, offering unique insights into the developmental trajectory and intellectual dynamics of the GET field.

Finally, focus on high-frequency keywords underscores the prominence of terms like “transportation”, “sustainability”, and “renewable energy”. Sustainable energy consumption emerges as a research hotspot. The temporal thematic evolution of GET research from 1994 to 2020 reveals a diversification in study directions. Clustering analysis closely linked to the term “determinants” identifies eight research themes, further categorized into four distinct facets: (a) technical matter, (b) adopter level, (c) corporate promotion, and (d) environmental challenge. This categorization provides a comprehensive understanding of the determinants influencing GET.

CONCLUSION

The paper discusses the trajectory of Green Energy Transportation (GET) research, highlighting a shift from sluggish activity before 2010 to increased interest post-2010 due to growing global concerns about climate change and environmental pollution. Key figures like Darko Amos and White Robin J have made significant contributions, with Amos standing out for his impact on collaboration

networks. Despite individual productivity, collaboration among authors in the field remains somewhat limited. The Journal of Cleaner Production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, and Energy Policy are identified as major contributors to scientific production in the GET domain. Geographically, the USA, China, and England are primary generators of GET research, but a persistent geographical divide poses challenges. Citation network analysis reveals influential publications and emphasizes keywords such as “transportation”, “sustainability”, and “renewable energy”. The temporal thematic evolution from 1994 to 2020 shows diversification in study directions, with eight research themes linked to the term “determinants” and categorized into technical matters, adopter level, corporate promotion, and environmental challenges. Overall, the analysis provides a nuanced understanding of the evolution, contributors, and influential factors shaping Green Energy Transportation research and Smart economy transforms the traditional law of supply and demand into the law of “smartly intertwined” aggregate demand and supply [17].

REFERENCE

- Chien-Chiang L., Wenwu X., Chi-Chuan L. (2022) The Impact of Energy Security on Income Inequality: The Key Role of Economic Development. *Energy*, 248, 123564. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123564>.
- IEA (24 October 2023) *The Energy World is Set to Change Significantly by 2030, Based on Today's Policy Settings Alone*. Available at: <https://www.iea.org/news/the-energy-world-is-set-to-change-significantly-by-2030-based-on-today-s-policy-settings-alone>.
- Zarnikau J. (2003) Consumer demand for ‘green power’ and energy efficiency. *Energy Policy*, 31 (15), 1661–1672. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(02\)00232-x](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(02)00232-x).
- Unian Nations. *Renewable Energy – Powering a Safer Future*. Available at: <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy> (accessed 08 September 2024).
- Unian Nations. *2019 Climate Action Summit*. Available at: <https://www.un.org/en/climatechange/2019-climate-action-summit> (accessed 2 October 2024).
- Kwilinski A., Lyulyovi O., Pimonenko T. (2024) Reducing Transport Sector CO₂ Emissions Patterns: Environmental Technologies and Renewable Energy. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10 (1), 100217. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100217>.
- Zennouche M., Zhan, J., Wan, B. W. (2014) Factors Influencing Innovation at Individual, Group and Organisational Levels: A Content Analysis. *International Journal of In-*

- formation Systems and Change Management*, 7 (1), 23–42. <https://doi.org/10.1504/IJISCM.2014.065052>.
8. Prancutė R. (2021) Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today's Academic World. *Publications*, 9 (1), 12. <https://doi.org/10.3390/publications9010012>.
 9. Banerjee S. (2023) Analysis of Open Access Research Platforms Launched by For-Profit Organizations. Available at: <https://openscience.eu/article/infrastructure/open-research-platforms-part-2> (accessed 13 December 2024).
 10. Wang X., Xu Z., Su S.-F., Zhou W. (2021) A Comprehensive Bibliometric Analysis of Uncertain Group Decision Making from 1980 to 2019. *Information Sciences*, 547, 328–353. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.08.036>.
 11. Lim W. M., Kumar S., Donthu N. (2024) How to Combine and Clean Bibliometric Data and Use Bibliometric Tools Synergistically: Guidelines Using Metaverse Research. *Journal of Business Research*, 182, 114760. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114760>.
 12. Newman M. E. J. (2004) Coauthorship Networks and Patterns of scientific Collaboration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101 (suppl 1), 5200–5205. <https://doi.org/10.1073/pnas.0307545100>.
 13. *Sustainability*. Available at: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability> (accessed 24 October 2024).
 14. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews> (accessed 24 October 2024).
 15. *Energy and Buildings*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/journal/energy-and-buildings/vol/14/issue/2> (accessed 04 December 2024).
 16. Zhudro M. K., Zhudro M. M. (2023) Export diagnostics of Complementarity of the SMART Industry of Belarus and China. *Belarus-China: Contours of Innovative and Technological Cooperation: Collection of Materials of the Scientific and Practical Conference, Minsk, Scientific and Technological Park BNTU "Polytechnic", October 19–20, 2023*. Minsk, BNTU, 16–18 (in Russian).
 17. Zhudro M. M., Zhudro V. M. (2023) Smart Economy Transforms the Traditional Law of Supply and Demand Into the Law of “Smartly Intertwined” Aggregate Demand and Supply. *Political, Economic and Sociocultural Aspects of Regional Governance in the European North: Materials of the XVI All-Russian Scientific. Conf. (with International Participation) (April 26–28, 2023, Syktyvkar)*. Syktyvkar, The Komi Republican Academy Of State Service And Administration, 345–354 (in Russian).

Received: 22.08.2024

Accepted: 25.10.2024

Published online: 31.03.2025