

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. 22 / No 5 / 2023

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

Машиностроение и машиноведение

- Сапсальёв Д. В., Петровская А. С., Радюкевич Д. Л.,
Толстая Т. Н., Мельникова Г. Б., Чижик С. А.
Структура и свойства многослойных
нанокomпозиционных покрытий
поливинилового спирта с наночастицами
оксида алюминия 359
- Литвинко А. А.
Технология горячего брикетирования
отходов черных металлов в пресс-формах
с подвижной матрицей 367

Механика деформируемого твердого тела

- Степаненко Д. А., Мудинов И., Охремчик В. А.,
Билейчик А. А.
О возможности применения
программы COMSOL Multiphysics
для топологической оптимизации пластин
для остеосинтеза 376

CONTENTS

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Sapsaliou D. V., Petrovskaya A. S., Radyukevich D. L.,
Tolstaya T. N., Melnikova G. B., Chizhik S. A.
Structure and Properties
of Multilayer Nanocomposite Coatings
of Polyvinyl Alcohol
with Aluminum Oxide Nanoparticles 359
- Litvinko A. A.
Hot Briquetting Technology
for Ferrous Metal Waste in Molds
with Movable Matrix 367

Deformation in Solid Mechanics

- Stepanenko D. A., Mudinov I., Akhremchik V. A.,
Bileichyk H. A.
On Possibility of Application
of COMSOL Multiphysics Software
for Topological Optimization
of Osteosynthesis Plates 376

Приборостроение

- Бручковский И. И., Литвинович Г. С.**
Спектрометр для оценки содержания SO₂
в вулканических выбросах 387

Строительство

- Leonovich S. N., Sadovskaya E. A., Koleda A. A.**
Multi-Parameter Methodology for Assessing Quality
Indicators of Nanomodified Fiber-Reinforced
Concrete for Construction Site
(**Леонович С. Н., Садовская Е. А., Коледа А. А.**
Многопараметрическая методика оценки
показателей качества наномодифицированного
фибробетона для строительной площадки) 397

Физико-математические науки

- Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A.,
Kuleshov V. K.**
Study of Vertically Oriented Solar Battery
by Exposure of Concentrated Solar Radiation
(**Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А.,
Кулешов В. К.**
Исследование вертикально ориентированной
солнечной батареи при воздействии
концентрированного солнечного излучения) 405

Энергетика

- Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю.,
Новаш И. В., Румянцев Ю. В.**
Динамические свойства алгоритма
дистанционных измерений
в цифровых органах сопротивления 411
- Седнин В. А., Игнатович Р. С., Иокова И. Л.**
О целесообразности строительства мини-ТЭЦ
на местных видах топлива в условиях
Республики Беларусь.
Часть 1. Состояние использования местных
видов топлива в системах теплоснабжения 418
- Ataullaev N. O., Dziaruhina A. A., Murodov K. S.**
Static Characteristics of Magnetic Modulation DC
Converters with an Analog Filter
(**Атауллаев Н. О., Дерюгина Е. А.,
Муродов Х. Ш.** Статические характеристики
преобразователей постоянного тока с магнитной
модуляцией с аналоговым фильтром) 428

Экономика

- Месник Д. Н., Вечёрко Д. А.**
Механизм развития
транспортно-логистической системы:
инфраструктуры электрического транспорта 433

Instrumentation Engineering

- Bruchkouski I. I., Litvinovich H. S.**
Spectrometer for Estimating SO₂
Content in Volcanic Plumes 387

Civil and Industrial Engineering

- Leonovich S. N., Sadovskaya E. A., Koleda A. A.**
Multi-Parameter Methodology for Assessing Quality
Indicators of Nanomodified Fiber-Reinforced
Concrete for Construction Site 397

Physical and Mathematical Sciences

- Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A.,
Kuleshov V. K.**
Study of Vertically Oriented Solar Battery
by Exposure of Concentrated Solar Radiation 405

Power Engineering

- Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V.,
Rumiantsev Yu. V.**
Dynamic Properties
of Remote Sensing Algorithm
in Digital Resistance Elements 411
- Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L.**
On the Feasibility of Building Mini-Thermal
Power Plant Using Local Fuels in the Conditions
of the Republic of Belarus.
Part 1. State of Use of Local Fuels
in Heat Supply Systems 418
- Ataullaev N. O., Dziaruhina A. A., Murodov K. S.**
Static Characteristics of Magnetic Modulation DC
Converters with an Analog Filter 428

Economy in Industry

- Mesnik D. N., Vecherko D. F.**
Mechanism for Development
of Transport and Logistics System:
Electric Transport Infrastructure 433

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (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),
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- 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),
- Пенязков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (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),
- Leonovich S. N.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- 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, Комотини, 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),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижики С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Шелег В. К. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
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),
Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),
Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
Sheleg V. K. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
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 29.09.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 9,57. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2023

Lead Science Editor

V. N. Guryanichyk

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/10.21122/2227-1031-2023-22-5-359-366>

УДК 539.23

Структура и свойства многослойных нанокмпозиционных покрытий поливинилового спирта с наночастицами оксида алюминия

Магистры Д. В. Сапсальёв^{1,2)}, А. С. Петровская¹⁾, Д. Л. Радюкевич¹⁾,
Т. Н. Толстая¹⁾, канд. техн. наук, доц. Г. Б. Мельникова¹⁾,
академик НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. С. А. Чижик¹⁾

¹⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Создание нанокмпозиционных полимер-неорганических материалов, изучение их морфологии и механических свойств на наноуровне актуальны в области разработки новых материалов различного функционального назначения, в том числе медицинского. В результате проведенных исследований разработана методика получения одно- и многослойных пленок поливинилового спирта и композиционных полимерных покрытий с наночастицами оксида алюминия методом спин-коатинга. Показано, что оптимальное массовое содержание наночастиц оксида алюминия в суспензии для получения однородных композиционных покрытий составляет 0,625 %. На основании данных о структурно-морфологических и механических свойствах сформированных покрытий, полученных методом атомно-силовой микроскопии, установлено, что увеличение количества слоев композиционных покрытий приводит к росту числа конгломератов, что, в свою очередь, повышает шероховатость поверхности пленок. Модуль упругости однослойных пленок поливинилового спирта составляет $(509,5 \pm 10 \text{ \%})$ МПа. В случае пленок композиционных покрытий с наночастицами оксида алюминия изменения модуля упругости установлены для многослойных покрытий: увеличение до 559,0 МПа (5 слоев) и уменьшение до 415,2 МПа (10 слоев). Модуль упругости исследуемых однослойных покрытий значительно снижается в диапазоне 20–40 °С. Наименьшие значения после воздействия температур определены для пленок с наночастицами $(236,2 \pm 10 \text{ \%})$ МПа. Нанокмпозиенты демонстрируют рост краевого угла смачивания с увеличением количества слоев композиционных покрытий до 20. Последующий рост толщины покрытий (количества слоев) приводит к увеличению гидрофильности нанокмпозиентов. Разработанные составы нанокмпозиционных пленок перспективны в качестве сорбционных покрытий.

Ключевые слова: композиционные полимерные покрытия, поливиниловый спирт, неорганические наночастицы, оксид алюминия, спин-коатинг, атомно-силовая микроскопия

Для цитирования: Структура и свойства многослойных нанокмпозиционных покрытий поливинилового спирта с наночастицами оксида алюминия / Д. В. Сапсальёв [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 359–366. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-359-366>

Адрес для переписки

Сапсальёв Дмитрий Владимирович
Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова
НАН Беларуси
ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: 375 17 235-11-32
dsapsalev@list.ru

Address for correspondence

Sapsaliou Dmitry V.
A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute
of the National Academy of Science of Belarus
15, P. Brovka str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 235-11-32
dsapsalev@list.ru

Structure and Properties of Multilayer Nanocomposite Coatings of Polyvinyl Alcohol with Aluminum Oxide Nanoparticles

D. V. Sapsaliou^{1,2)}, A. S. Petrovskaya¹⁾, D. L. Radyukevich¹⁾, T. N. Tolstaya¹⁾, G. B. Melnikova¹⁾, S. A. Chizhik¹⁾

¹⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The nanocomposite polymer – inorganic materials formation, the study of their morphology and mechanical properties at the nanolevel is acute in the development of new materials for various functional purposes, including medical ones. As a result of the research the technique for producing single- and multilayer films of polyvinyl alcohol and composite polymer coatings with aluminum oxide nanoparticles by the spin coating method has been developed. It is shown that the optimal mass content of aluminum oxide nanoparticles in suspension for the formation of uniform composite coatings is 0.625 %. Based on experimental data on the structuralmorphological and mechanical properties of the formed coatings obtained by atomic force microscopy, it has been found that an increase in the number of layers of composite coatings leads to an increase in the number of conglomerates which, in turn, increases the surface roughness of the films. The modulus of elasticity of single-layer films of polyvinyl alcohol is $(509.5 \pm 10 \%)$ MPa. In the case of composite coatings with aluminum oxide nanoparticles, changes in the elastic modulus have been established for multilayer coatings: an increase to 559.0 MPa (5 layers) and a decrease to 415.2 MPa (10 layers). The modulus of elasticity of the investigated single-layer coatings is significantly reduced in the range of 20–40 °C. The smallest values after exposure to temperatures have been determined for films with nanoparticles $(236.2 \pm 10 \%)$ MPa. Nanocomposites demonstrate an increase in the contact angle with an increase in the number of layers of composite coatings up to 20. A subsequent increase in the thickness of the coatings (the number of layers) leads to an increase in the hydrophilicity of the nanocomposites. The developed compositions of nanocomposite films are promising as sorption coatings.

Keywords: composite polymer coatings, polyvinyl alcohol, inorganic nanoparticles, aluminum oxide, spin coating, atomic force microscopy

For citation: Sapsaliou D. V., Petrovskaya A. S., Radyukevich D. L., Tolstaya T. N., Melnikova G. B., Chizhik S. A. (2023) Structure and Properties of Multilayer Nanocomposite Coatings of Polyvinyl Alcohol with Aluminum Oxide Nanoparticles. *Science and Technique*. 22 (5), 359–366. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-359-366> (in Russian)

Введение

Доминирующая тенденция в разработке современных раневых повязок – использование полимерных композитов. Основными требованиями, предъявляемыми к покрытиям, являются антиаллергенность, биосовместимость и биодеградируемость. Кроме того, полимер не должен оказывать токсического воздействия [1]. Для эффективного лечения ран и раневой инфекции требуются перевязочные средства с высокой сорбционной активностью, способные эффективно удалять избыток раневого экссудата. Раневые покрытия также должны обладать проницаемостью для паров воды, но исключать высушивание раневой поверхности; предотвращать вторичное инфицирование раны; иметь высокую механическую прочность [2].

Применение раневых повязок на основе материалов природного происхождения, обладающих необходимыми биологическими свой-

ствами и влияющих на функции клеток, ограничено высокой скоростью деградации материалов, в то время как использование синтетических полимеров, таких как поливиниловый спирт (ПВС), полиакриловая и полиметакриловая кислоты и другие [3, 4], обеспечивает механическую прочность, но недостаточные биоактивные свойства [5, 6]. К преимуществам применения таких полимерных пленок относятся более высокая степень защиты по сравнению с тканевыми материалами, а также их полная атравматичность. Наибольший интерес для изготовления водорастворимых пленочных материалов представляет ПВС. Данный полимерный материал является достаточно доступным, дешевым и разрешенным для применения в пищевой промышленности и медицине. ПВС устойчив по отношению к большинству органических растворителей, масел и жиров, а также обладает высокой сорбционной активностью [7].

Модификация полимеров с использованием неорганических наночастиц позволяет форми-

ровать биоматериалы с улучшенными механическими и антибактериальными свойствами. Наночастицы оксида алюминия широко применяются в биомедицине благодаря их исключительным физико-химическим и структурным характеристикам (устойчивость к износу, химическим веществам, механическим воздействиям; пористая поверхность). Кроме того, биоинертность и функциональность поверхности позволяют использовать наночастицы Al_2O_3 (нч- Al_2O_3) в биологических средах. Высокая активность Al_2O_3 при взаимодействии с полярными веществами позволяет использовать его в качестве сорбирующего компонента в пленке [8, 9].

Таким образом, варьируя соотношение компонентов и условия формирования, можно получать композиционные полимерные покрытия различного состава, структуры и морфологии [10]. В связи с этим существенный интерес представляет исследование структуры и физико-механических свойств композиционных полимерных пленок на наноуровне.

Цель работы – формирование композиционных покрытий на основе поливинилового спирта и наночастиц оксида алюминия методом спин-коатинга, изучение их структурно-механических характеристик.

Материалы и методы исследования

Пленки ПВС формировали на кремниевых пластинах методом спин-коатинга из водного раствора полимера с концентрацией 1 мг/мл, обработанного ультразвуком в течение 5 мин (УЗ; Bandelin electronic, Германия; частота 35 кГц). Пластины монокристаллического кремния (ориентация 111, 1×1 см) предварительно гидрофилизовали выдерживанием в течение 15 мин при 70 °С в пероксидно-аммиачной смеси; затем подложки промывали дистиллированной водой и сушили в токе азота [11].

На водную суспензию наночастиц оксида алюминия 20 мас.% (далее – %), $d = 30\text{--}60$ нм (Sigma-Aldrich, Китай) предварительно воздействовали УЗ. Затем путем последовательного разбавления дистиллированной водой получали суспензии наночастиц с различным массовым содержанием Al_2O_3 . Рабочие суспензии для формирования композиционных покрытий

готовили добавлением к 1 мл раствора ПВС ($c = 2$ мг/мл) по 1 мл суспензии нч- Al_2O_3 . Полученные суспензии подвергали обработке УЗ в течение 15 мин.

Для формирования пленок методом спин-коатинга на кремниевые пластины, вращающиеся со скоростью 3200 об/мин, прикапывали растворы (суспензии) объемом 8 мкл. При получении многослойных покрытий между нанесением слоев выдерживали 1 мин для испарения остаточных количеств растворителя (вращение не прекращалось).

Морфологию, механические и термомеханические свойства поверхности сформированных пленок исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь). Для исследования термомеханических свойств пленки ПВС и композиционные покрытия с нч- Al_2O_3 нагревали до от 20 до 100 °С в течение 15 мин на термоплатформе АСМ. Подробное описание методики исследования представлено в работе [11].

Оценку гидрофильных свойств поверхности сформированных покрытий проводили на основании измерений краевых углов смачивания (КУС) на установке DSA 100E (KRUSS, Германия) методом лежащей капли [11].

Результаты и обсуждение

Методом АСМ установлено, что однослойное покрытие ПВС имеет однородную структуру поверхности (рис. 1а). В случае композиционных покрытий ПВС + нч- Al_2O_3 наблюдается рост числа и размеров конгломератов с увеличением содержания наночастиц Al_2O_3 в суспензии для формирования покрытий. Так, для пленок ПВС + нч- Al_2O_3 ($c = 5$ %) характерно большое количество скоплений наночастиц, объединенных в «островки» и «цепочки» (рис. 1б). Большое количество конгломератов в структуре нанокомпозитов обусловлено наличием гидроксильных групп в макромолекулах ПВС, и, как следствие, высокой степенью взаимодействия полимер–наночастицы (обволакивание наночастиц оксида алюминия). Так, согласно данным АСМ о морфологии поверхности, показано, что уменьшение содержания наночастиц оксида алюминия позволяет сформировать

однородные композиционные покрытия за счет снижения количества скоплений наночастиц, а также их более равномерного распределения в полимере. На поверхности покрытий ПВС + нч- Al_2O_3 ($c = 1,25\%$) присутствуют как конгломераты, так и отдельные наночастицы Al_2O_3 (рис. 1с). При содержании $0,625\%$ нч- Al_2O_3 в структуре поверхности покрытий наблюдается минимальное количество относительно равномерно распределенных конгломератов по сравнению со всеми исследуемыми концентрациями (рис. 1д). В последующем для получения многослойных композиционных покрытий и изучения их термомеханических свойств использовали суспензии с содержанием $0,625\%$ нч- Al_2O_3 .

Для многослойных пленок ПВС установлено, что с увеличением числа слоев до 10 возрастает количество дефектов на поверхности покрытий, что приводит к росту значений шероховатости (табл. 1). Последующее увеличение числа слоев до 20 и 30 сглаживает неровности поверхности и позволяет сформировать покрытия с минимальным количеством дефектов (рис. 2).

Получение многослойных композиционных полимер-неорганических пленок приводит к воз-

растанию значений шероховатости поверхности с увеличением количества слоев (табл. 1) в результате образования большого количества конгломератов (рис. 3).

Таблица 1

Значения шероховатостей поверхности пленок на основе ПВС и нанокomпозиционных покрытий ПВС + нч- Al_2O_3

Surface roughness values for the PVA based films and nanocomposite coatings PVA + Al_2O_3

Образец	R_a , нм	R_q , нм	Количество слоев	R_a , нм	R_q , нм	Образец
ПВС	1,6	1,9	1	17,9	23,7	ПВС + нч- Al_2O_3
	1,5	1,8	5	41,2	50,8	
	1,6	2,2	10	69,8	86,5	
	1,4	1,8	20	83,8	103,9	
	1,1	1,4	30	92	114,1	

Структура покрытий характеризуется плотным скоплением сферообразных конгломератов. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что, помимо обволакивания наночастиц оксида алюминия полимером, происходит также «наслаивание» пленки при нанесении каждого последующего слоя, что и приводит к увеличению размеров конгломератов.

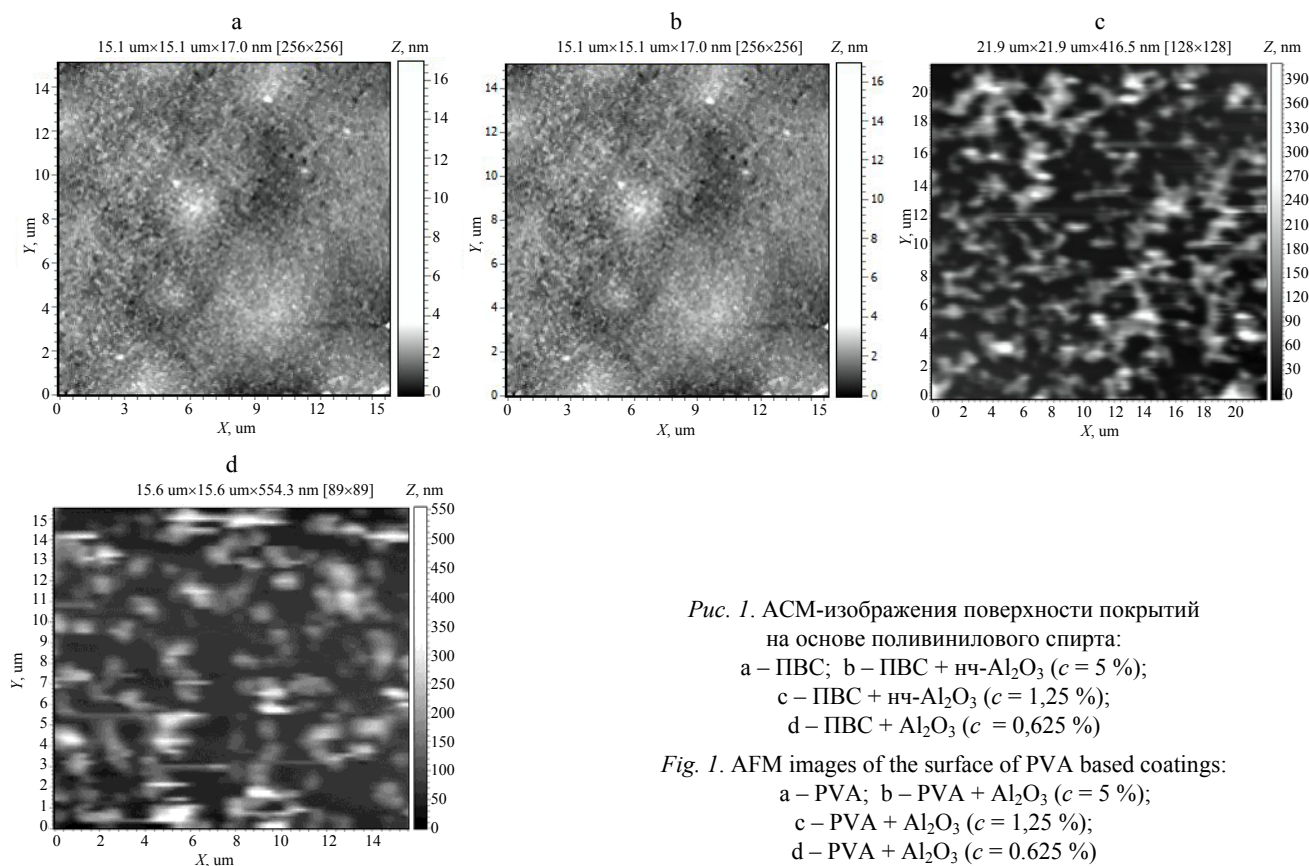
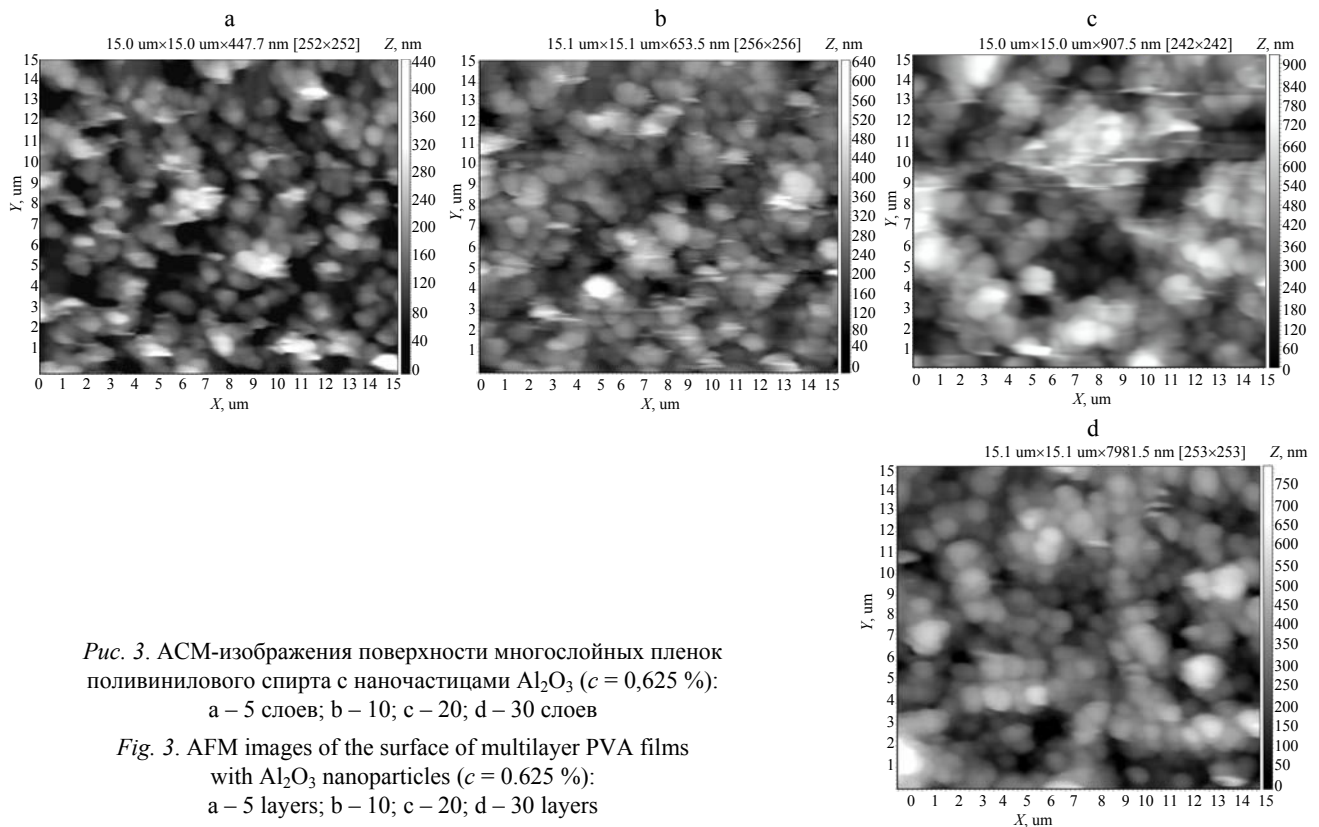
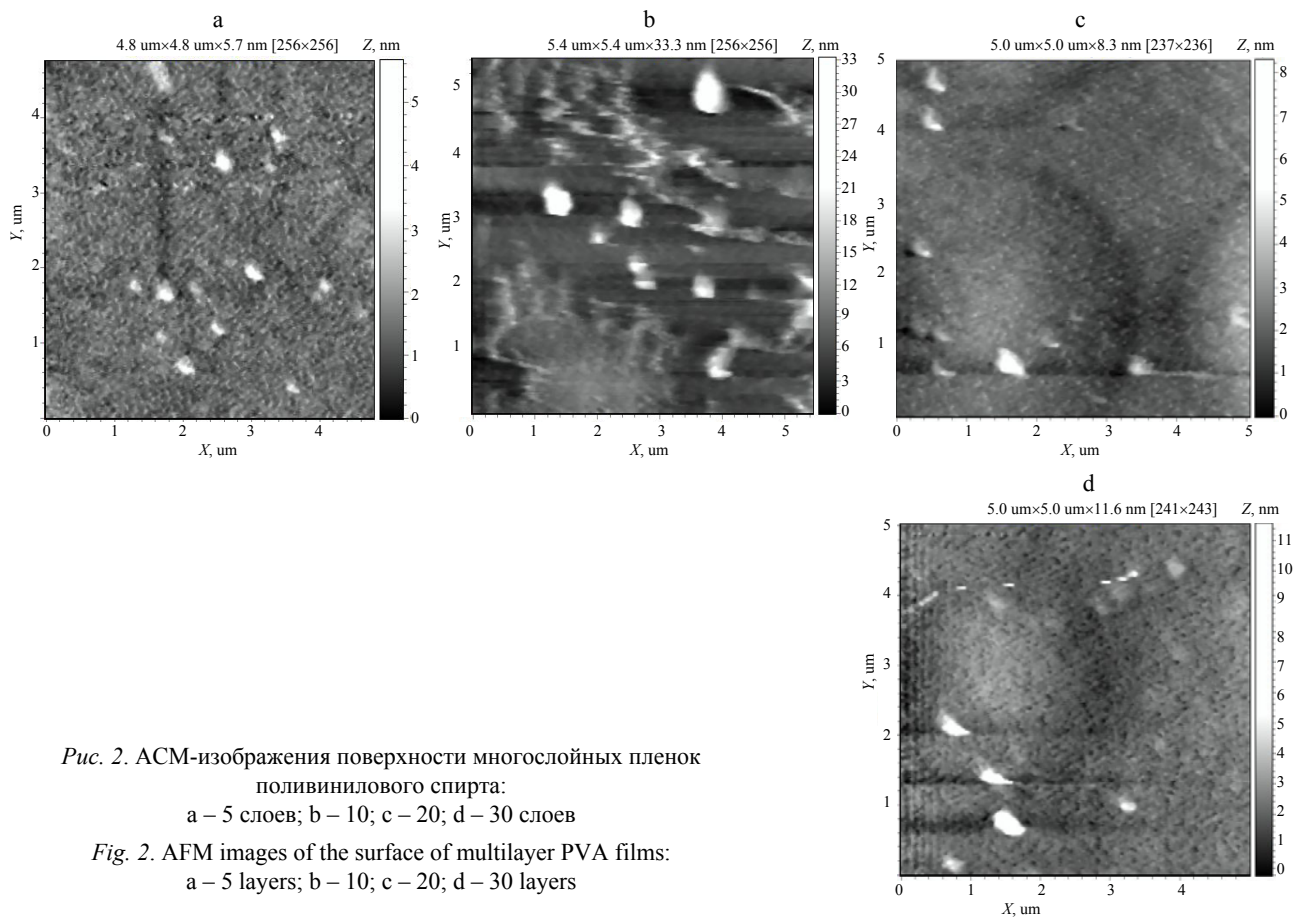


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности покрытий на основе поливинилового спирта: а – ПВС; б – ПВС + нч- Al_2O_3 ($c = 5\%$); в – ПВС + нч- Al_2O_3 ($c = 1,25\%$); д – ПВС + Al_2O_3 ($c = 0,625\%$)

Fig. 1. AFM images of the surface of PVA based coatings: а – PVA; б – PVA + Al_2O_3 ($c = 5\%$); в – PVA + Al_2O_3 ($c = 1,25\%$); д – PVA + Al_2O_3 ($c = 0.625\%$)



Результаты исследования механических свойств пленок ПВС и композиционных покрытий с наночастицами Al_2O_3 методом АСМ представлены на рис. 4. Модуль упругости пленок ПВС составляет $(509,5 \pm 10 \%)$ МПа, с увеличением количества слоев значения E не изменяются в пределах экспериментальной ошибки. Для композиционных пленок ПВС с наночастицами изменения модуля упругости установлены только для многослойных покрытий: увеличение E до 559,0 МПа (для 5-слойных) и уменьшение до 415,2 МПа (для 10-слойных). Предполагаем, что в случае 5-слойных пленок формируется плотное наноконпозиционное покрытие за счет равномерного распределения неорганических наночастиц в полимерной матрице, а также минимизации дефектов благодаря последовательному многослойному их закрытию.

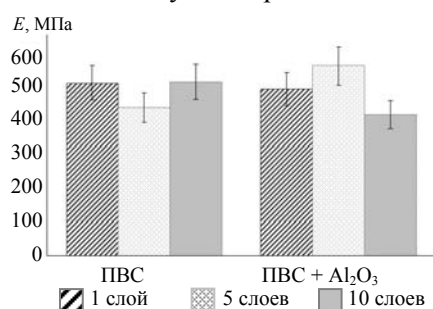


Рис. 4. Значения модуля упругости для пленок на основе поливинилового спирта

Fig. 4. Values of the elastic modulus for the PVA based films

На рис. 5 представлена диаграмма значений силы адгезии пленок ПВС и композиционных покрытий с наночастицами Al_2O_3 .

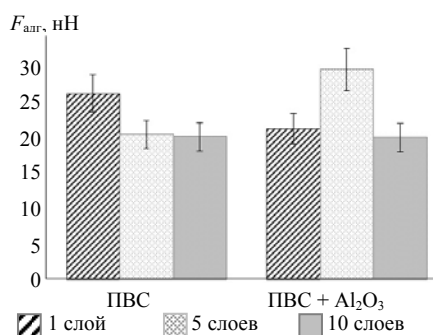


Рис. 5. Значения силы адгезии для пленок на основе поливинилового спирта

Fig. 5. Adhesion force values for the PVA based films

Установлено, что введение наночастиц в однослойные полимерные пленки приводит к снижению значений $F_{\text{адг}}$ до 21,0 нН. В случае многослойных пленок (5 слоев) при введе-

нии Al_2O_3 наблюдается увеличение значений силы адгезии. Изменений $F_{\text{адг}}$ при введении наночастиц в полимерные 10-слойные покрытия установлено не было.

Результаты исследования термомеханических свойств композиционных полимерных покрытий представлены на рис. 6. Установлено, что модуль упругости исследуемых пленок после воздействия температур значительно снижается: наибольший перепад величины E происходит в диапазоне температур 20–40 °С, дальнейшее увеличение температуры значительного влияния на модуль упругости не оказывает: отклонения значений происходят в пределах экспериментальной ошибки.

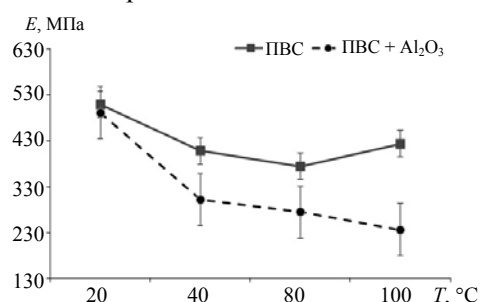


Рис. 6. Термомеханические свойства однослойных полимерных покрытий на основе поливинилового спирта

Fig. 6. Thermomechanical properties of single-layer PVA based coatings

Следует отметить, что наименьшие значения E после воздействия температур зафиксированы у пленок с наночастицами: $(236,2 \pm 10 \%)$ МПа. Снижение модуля упругости покрытий обусловлено деструктуризацией полимерных монослоев в результате введения неорганических наночастиц.

Исследование гидрофильных свойств поверхности сформированных покрытий показало, что с увеличением количества слоев полимерных покрытий до 20 наблюдается рост значений КУС. Увеличение количества слоев ПВС до 30 приводит к повышению смачиваемости поверхности – КУС снижается до исходных значений, что обусловлено соответствующим изменением дисперсионной составляющей удельной поверхностной энергии (рис. 7а, d). В случае наноконпозиционных покрытий установлен пологий характер увеличения значений w в зависимости от количества полимерных слоев, что обусловлено ростом полярной составляющей удельной поверхностной энергии (рис. 7б, с), основной вклад в которую вносит наличие конгломератов «свободных» наночастиц на поверхности покрытия.

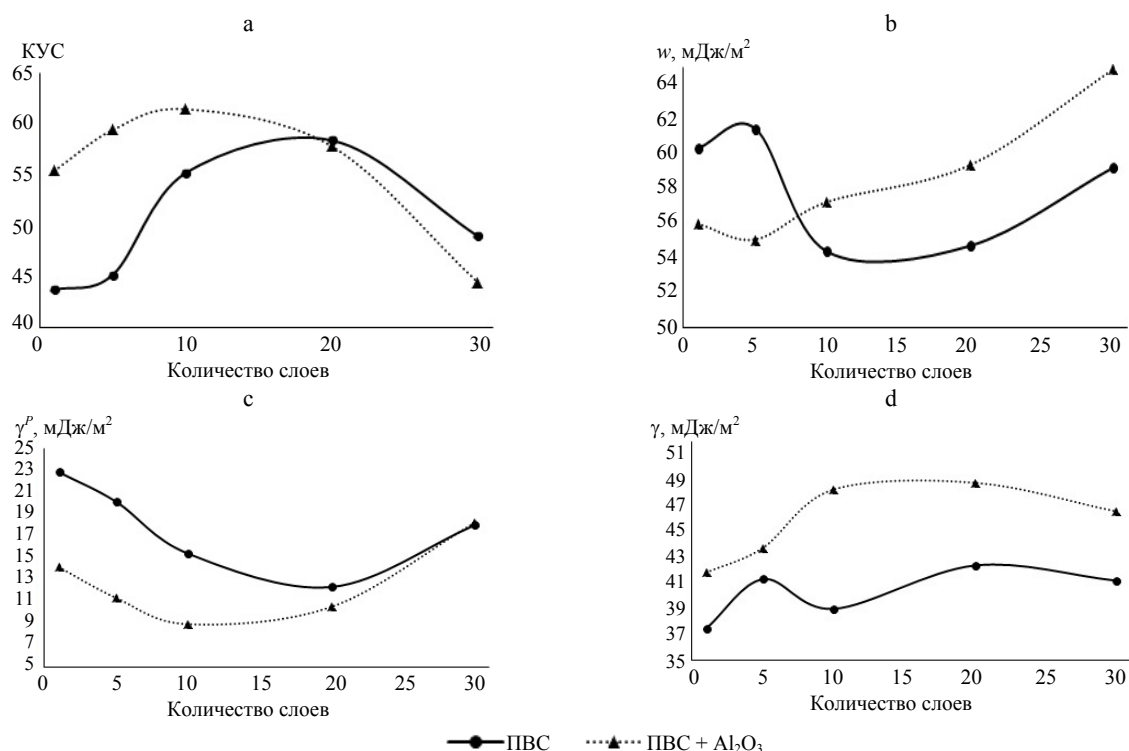


Рис. 7. Зависимости значений краевого угла смачивания (а), удельной поверхностной энергии (б), полярной (с) и дисперсионной (д) составляющих удельной поверхностной энергии от количества слоев полимерных покрытий

Fig. 7. Dependences of the values of the contact angle (a), specific surface energy (b), polar (c) and dispersion (d) components of the specific surface energy on the number of layers of polymer coatings

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика получения нанокомпозиционных пленок ПВС с наночастицами оксида алюминия методом спин-коатинга. На основании АСМ-данных выбрана оптимальная концентрация нч- Al_2O_3 в суспензии для формирования однородных нанокомпозиционных покрытий ($c = 0,625\%$). Методом АСМ установлено, что однослойное покрытие ПВС имеет однородную структуру. Увеличение количества слоев композиционных пленок приводит к росту числа конгломератов, что, в свою очередь, повышает шероховатость поверхности многослойных пленок. Максимальное значение $R_q = 114,1$ нм было установлено для многослойной (30 слоев) пленки ПВС с наночастицами Al_2O_3 .

2. На основе данных механических и термомеханических свойств сформированных покрытий показано, что пленки ПВС и ПВС + нч- Al_2O_3 имеют близкие значения E в пределах доверительного интервала. Нагревание пленок приводит к снижению модуля упругости исследуемых однослойных покрытий.

Наименьшие значения E после воздействия температур (от 40 до 100 °С) зафиксированы у полимерных пленок с наночастицами ($E = 236,2$ МПа).

3. На основании полученных данных об увеличении значений шероховатости, смачиваемости поверхности 30-слойные композиционные пленки на основе ПВС могут быть рекомендованы в качестве перспективных сорбционных покрытий.

Работа выполнена в рамках договора с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований № T21M-051 от 01.07.2021.

ЛИТЕРАТУРА

- Хлыстова, Т. С. Технология получения лечебных депо-материалов на текстильной и гидрогелевой основе с использованием печатных композиций из смеси биополимеров – полисахаридов: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02 / Т. С. Хлыстова. М., 2015. 180 с.
- Макаренко, М. В. Современные подходы к разработке раневых покрытий / М. В. Макаренко, В. П. Курченко, С. А. Усанов // Труды БГУ. Сер. Физиологические,

- биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. 2016. Т. 11, ч. 1. С. 273–279.
3. Mallakpour, S. Enhancement in Thermal Properties of Poly(Vinyl Alcohol) Nanocomposites Reinforced with Al_2O_3 Nanoparticles / S. Mallakpour, M. Dinari // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2012. Vol. 32, No 4. P. 217–224. <https://doi.org/10.1177/0731684412467236>.
 4. Соловьев, В. С. Полимерные водопоглощающие композиции с повышенной прочностью / В. С. Соловьев, М. В. Успенская, Н. В. Сиротинкин // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. Т. 53, № 4. С. 63–65.
 5. Современные раневые покрытия в лечении гнойных ран / Ю. С. Винник [и др.] // *Новости хирургии*. 2015. Т. 23, № 5. С. 552–558. <https://doi.org/10.18484/2305-0047.2015.5.552>.
 6. Polyvinyl Alcohol and Pectin Blended Films: Preparation, Characterization and Mesenchymal Stem Cells Attachment / A. Kraskouski [et al.] // *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2021. Vol. 109, Iss. 8. P. 1379–1392. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37130>.
 7. Амерханова, Ш. К. Особенности сорбционных свойств модифицированных полимерных пленок на основе поливинилового спирта / Ш. К. Амерханова, Р. М. Шляпов, А. С. Уали // Сорбционные и хроматографические процессы. 2012. Т. 12, № 6. С. 875–883.
 8. Куделин, Н. Адсорбционная способность наноразмерного оксида алюминия / Н. Куделин, Н. К. Кхань // *Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XI Всероссийской науч.-практ. конф. студ. и аспирантов*. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. Т. 1. С. 91–93.
 9. Адсорбционные свойства оксида алюминия, модифицированного наночастицами Co и CoO / С. Н. Ланин [и др.] // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2017. Т. 53, № 3. С. 247–254. <https://doi.org/10.7868/S0044185617030159>.
 10. Абилова, Г. К. Разработка технологии получения гидрогелевых лекарственных форм и повязок: дис. ... д-ра философии: 6D072100 / Г. К. Абилова. Алматы, 2019. 135 с.
 11. Структура и свойства многослойных нанокомпозиционных покрытий хитозана с наночастицами оксида алюминия / Д. В. Сапсальев [и др.] // *Полимерные материалы и технологии*. 2023. Т. 9, № 1. С. 52–58. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-1-52-58>.
- Поступила 18.04.2023
Подписана в печать 20.06.2023
Опубликована онлайн 29.09.2023
- REFERENCES
1. Khlystova T. S. (2015) *Technology for Obtaining Medical Depot Materials on a Textile and Hydrogel Basis Using Printed Compositions From a Mixture of Biopolymers – Polysaccharides*. PhD eng. sci. diss. Moscow. 180 (in Russian).
 2. Makarenko M. V., Kurchenko V. P., Usanov S. A. (2016) Modern Approaches to the Development of Wound Coverings. *Trudy BGU. Seriya: Fiziologicheskie, Biokhimicheskie i Molekulyarnye Osnovy Funktsionirovaniya Biosistem = Proceedings of the Belarusian State University. Series of Physiological, Biochemical and Molecular Biology Sciences*, 11 (1), 273–279 (in Russian).
 3. Mallakpour S., Dinari M. (2012) Enhancement in Thermal Properties of Poly (Vinyl Alcohol) Nanocomposites Reinforced with Al_2O_3 Nanoparticles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32 (4), 217–224. <https://doi.org/10.1177/0731684412467236>.
 4. Solov'ev V. S., Uspenskaya M. V., Sirotyukin N. V. (2010) Polymeric Water-Absorbing Compositions with Increased Strength. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. PriBOROSTROENIE = Journal of Instrument Engineering*, 53 (4), 63–65 (in Russian).
 5. Vinnik Yu. S., Markelova N. M., Solov'eva N. S., Shishatskaya E. I., Kuznetsov M. N., Zuev A. P. (2015) Modern Wound Dressings in the Treatment of Purulent Wounds. *Novosti Khirurgii*, 23 (5), 552–558. <https://doi.org/10.18484/2305-0047.2015.5.552> (in Russian).
 6. Kraskouski A., Hileuskaya K., Kulikouskaya V., Kabanava V., Agabekov V., Pinchuk S., Vasilevich I., Volotovskii I., Kuznetsova T., Lapitskaya V. (2021) Polyvinyl alcohol and Pectin Blended Films: Preparation, Characterization and Mesenchymal Stem Cells Attachment. *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, 109 (8), 1379–1392. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37130>.
 7. Amerkhanova Sh. K., Shlyapov R. M., Uali A. S. (2012) Peculiarities of Sorption Properties of Modified Polymer Films Based on Polyvinyl Alcohol. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protssy = Sorption and Chromatography processes*, 12 (6), 875–883 (in Russian).
 8. Kudelin N., Kkhan' N. K. (2010) Adsorption Capacity of Nanosized Aluminum Oxide. *Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya v XXI veke: Materialy XI Vserossiiskoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii Studentov i Aspirantov. T. 1* [Chemistry and Chemical Technology in the 21st Century: Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Postgraduates. Vol. 1]. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 91–93 (in Russian).
 9. Lanin S. N., Bannykh A. A., Vlasenko E. V., Vinogradov A. E., Lanina K. S., Levachev S. M. (2017) Adsorption Properties of Aluminum Oxide Modified with Co and CoO Nanoparticles. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 53 (3), 408–415. <https://doi.org/10.1134/s2070205117030145>.
 10. Abilova G. K. *Development of Technology for Obtaining Hydrogel Dosage Forms and Dressings*. PhD. diss. Almaty, 2019, 135 (in Russian).
 11. Sapsaliou D. V., Petrovskaya A. S., Radyukevich D. L., Khabarava A. V., Melnikova G. B., Chizhik S. A. (2023) Structure and Properties of Multilayer Nanocomposite Coatings of Chitosan with Aluminum Oxide Nanoparticles. *Polimernye Materialy i Tekhnologii = Polymer Materials and Technologies*, 9 (1), 52–58. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-1-52-58> (in Russian).

Received: 18.04.2023

Accepted: 20.06.2023

Published online: 29.09.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375>

УДК 620.531.433

Технология горячего брикетирования вторичных черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей

Инж. А. А. Литвинко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В работе описана технология горячего брикетирования структурно-неоднородных отходов металлообработки в пресс-формах с подвижной матрицей, отличающаяся от известных аналогов возможностью повышения качества брикетов при минимальном количестве подготовительных операций. Целью работы является совершенствование процесса горячего брикетирования. Решаемые задачи заключаются в разработке технологической схемы и физико-математической модели процесса, снижении сил контактного трения и износа инструмента, оптимизации энергосиловых параметров по критериям плотности и прочности брикетов. Технологическая схема брикетирования представлена пресс-формой с подвижной матрицей, в которой в качестве упругой опоры используется сжатый воздух. В процессе брикетирования матрица и прессуемый металл перемещаются в одном и том же направлении. Сила бокового трения является активной, направленной в сторону усилия брикетирования. В итоге снижаются усилие и работа брикетирования, износ пресс-формы, а сам брикет получается высокого качества – однородным по плотности и без внутренних дефектов. В результате численного расчета модели получены зависимости напряженного состояния прессовки и давления прессования от координат и плотности на контактных поверхностях и в глубине материала, что позволяет производить расчет на прочность деталей пресс-формы и подобрать оборудование для осуществления процесса брикетирования. Изучены закономерности формирования структуры брикета, показаны преимущества применения предложенной технологической схемы в сравнении с брикетированием в неподвижной матрице. Предлагаемая технология исключает выполнение предварительной операции удаления смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) центрифугированием или другими известными способами. СОЖ удаляется термической возгонкой, частично сжигается в топке печи, частично конденсируется в системе «мокрой» очистки.

Ключевые слова: схема, давление, модель, горячепрессованный брикет, качество, напряжения, плотность, прочность, структура, пресс-форма, пуансон, матрица, подвижная, силы, трение, износ, инструмент

Для цитирования: Литвинко, А. А. Технология горячего брикетирования вторичных черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей / А. А. Литвинко // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 367–375. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375>

Hot Briquetting Technology of Secondary Ferrous Metals in Molds with Movable Matrix

A. A. Litvinko¹⁾

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

Abstract. The paper describes the technology of hot briquetting of structurally heterogeneous metalworking waste in molds with a movable matrix, which differs from known analogues in the possibility of improving the quality of briquettes with a minimum number of preparatory operations. The aim of the work is to improve the process of hot briquetting. The tasks to be solved are to develop a technological scheme and a physical and mathematical model of the process, reduce the forces of contact friction and tool wear, and optimize the energy-power parameters according to the criteria for the density and strength of briquettes. The technological scheme of briquetting is represented by a mold with a movable matrix, in which compressed air is used as an elastic support. During the briquetting process, the matrix and the pressed metal move in the same direction. The lateral friction force is active, directed towards the briquetting force. As a result, the force and work of briquetting, mold wear are reduced, and the briquette itself is of high quality – uniform in density and without internal defects.

Адрес для переписки

Литвинко Артем Анатольевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-91
niil_svarka@bntu.by

Address for correspondence

Litvinko Artyom A.
Belarusian National Technical University
22/2, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-91
niil_svarka@bntu.by

As a result of the numerical calculation of the model, the dependences of the stress state of the pressing and pressing pressure on the coordinates and density on the contact surfaces and in the depth of the material were obtained, which makes it possible to calculate the strength of the mold parts and select equipment for the briquetting process. The regularities of formation of the briquette structure are studied, the advantages of using the proposed technological scheme in comparison with briquetting in a fixed matrix are shown. The proposed technology eliminates the implementation of the preliminary operation of coolant removal by centrifugation or other known methods. Coolant is removed by thermal sublimation, partially burned in the furnace firebox, partially condensed in the “wet” cleaning system.

Keywords: scheme, pressure, model, hot-pressed briquette, quality, stress, density, strength, structure, mold, punch, matrix, movable, forces, friction, wear, tool

For citation: Litvinko A. A. (2023) Hot Briquetting Technology of Secondary Ferrous Metals in Molds with Movable Matrix. *Science and Technique*. 22 (5), 367–375. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375> (in Russian)

Введение

Получение качественных шихтовых материалов из отходов металлообработки – важнейшая составляющая ресурсного обеспечения металлургического производства [1–4]. К вторичным черным металлам относятся: стальная и чугунная стружка, колотая дробь, шлифовальные, опилочные и обкатные шламы, металлизированная пыль от обдирочных, наждачных и заточных станков, мелкофракционные отсеvy ферросплавов и др.

Широкое применение в практике переработки металлоотходов получил плавильный передел как наиболее универсальный метод. Рациональным и эффективным способом подготовки металлоотходов к переплаву является горячее брикетирование. Как было показано в работах [5–10], данный вид переработки применяется для получения качественных металлургических брикетов и композитов плотностью не менее 90 % плотности компактных чугунов и сталей, что, в принципе, эквивалентно превращению дисперсных и загрязненных частиц металла в габаритный кусковой лом. В процессе плавки брикеты полностью погружены в расплав, не всплывают на поверхность металлической ванны и не окисляются. Технология горячего брикетирования предполагает полное и экологически безопасное удаление жидкой фазы в процессе нагрева шихты до температур неполной горячей деформации 700–850 °С. Данный температурный интервал оптимальный для черных металлов, минимизирующий окисление частиц, потери теплоты, силовые и энергетические затраты на производство брикетов [1].

Настоящая работа посвящена дальнейшему совершенствованию процесса брикетирования путем применения пресс-форм с подвижной матрицей, в которых процесс формования брикетной массы протекает при более однородном распределении плотности, что снижает трение и износ деталей пресс-формы, энергосиловые параметры

и обеспечивает значительное повышение плотности и прочности готовых брикетов.

Технологическая схема брикетирования

Технология горячего брикетирования включает следующие технологические операции:

1) дробление стальной стружки на фракции до 15 мм в валковом шредере, сепарирование стружки и шламов в галтовочных барабанах или на вибросите с целью удаления концевых отходов и других твердых предметов (резцов, болтов, гаек, брусков абразива и пр.), отмывку и «мокрую» магнитную сепарацию шлифовальных шламов, механический отжим металлических порошков шламов от водного раствора, дробление «сухих» шламовых брикетов в порошок;

2) приготовление шихты смешиванием компонентов в шнековом смесителе;

3) безокислительный нагрев шихты до температур неполной горячей деформации 700–850 °С в защитной атмосфере продуктов термической возгонки масляной компоненты смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ);

4) пиролиз углеводородных соединений с целью получения углеродного покрытия, предохраняющего металл от окисления на выходе из печи и выполняющего роль смазки в процессе горячего брикетирования;

5) сжигание масла, обладающего высокой теплотворной способностью, совместно с природным газом;

6) дожигание СО, очистку, рекуперацию теплоты и обезвреживание дымовых газов методом «мокрой» очистки в насадочном скруббере Вентури, сбор и утилизацию масляного конденсата, сажи и абразива;

7) засыпку шихты в приемный бункер брикетировочного пресса при минимальных потерях теплоты (не более 50 °С);

8) брикетирование шихты на гидравлическом прессе под давлением 470–500 МПа в пресс-форме с подвижной матрицей.

Технологическая схема брикетирования металлоотходов в подвижной матрице приведена на рис. 1. Процесс брикетирования заготовки 1 производится в жесткой цилиндрической матрице 2, запрессованной в поршень 3 пневмоцилиндра 4. Процесс брикетирования происходит, когда поршень 3 находится в своем исходном верхнем положении. При обратном холостом ходе пуансона 5 пневмосистема с помощью пуансона 6 возвращает матрицу в исходное верхнее положение. Брикет выталкивается из матрицы пуансоном 6. Далее цикл повторяется.

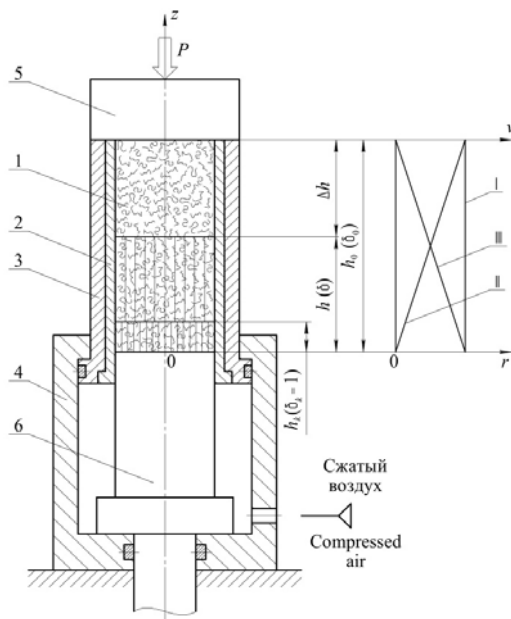


Рис. 1. Технологическая схема брикетирования дискретных материалов в подвижной матрице

Fig. 1. Technological scheme of briquetting of discrete materials in a movable matrix

На рис. 1 показаны графики скоростей перемещения: I – верхнего пуансона 5 и матрицы 2, II – частиц металла по высоте прессовки 1, III – матрицы 2 относительно прессовки 1. Скорость частиц металла по высоте прессовки уменьшается от максимального значения до нуля, т. е. матрица, движущаяся с постоянной скоростью, обгоняет прессуемый металл.

Силы бокового трения активны, направлены в сторону усилия прессования P . И только по периметру верхнего торца прессовки в верхних углах закрытого пространства матрицы металл «защемлен», движется со скоростью матрицы, скорость перемещения металла относительно матрицы, а, следовательно, и силы трения равны нулю. Направления векторов реактивных напряжений на боковой поверхности прессовки показаны на рис. 2.

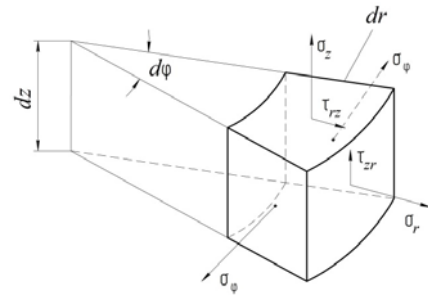


Рис. 2. Элементарный объем очага деформации с компонентами тензора напряжений дискретного материала, брикетированного в подвижной матрице

Fig. 2. Elementary volume of the deformation focus with stress tensor components of a discrete material briquetted in a movable matrix

Результаты моделирования

Моделирование процесса брикетирования и математические расчеты, приведенные в работе [2], позволили установить оптимальные значения давления прессования и выявить закономерности, связанные с распределением напряжений и плотности на контактных поверхностях и в глубине материала. Полученная система уравнений позволяет производить расчет на прочность деталей пресс-формы и выбрать оборудование для осуществления процесса брикетирования:

$$p = \sigma + \tau = \frac{1}{\eta} \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \sin \beta = k \sin \beta; \quad (2)$$

$$\xi = \varepsilon (\delta - \delta_0)^m; \quad (3)$$

$$\frac{3\xi^2}{\eta^2 + 3\xi^2} \ln \frac{\eta}{\eta + \sqrt{3}\xi \tan \beta} - \frac{\sqrt{3} [\eta^2 (1 + \xi) + 3\xi^2]}{\eta (\eta^2 + 3\xi^2)} \beta - \frac{\eta^2}{2(\eta^2 + 3\xi^2)} \ln (tg^2 \beta + 1) + \ln \sqrt{tg^2 \beta + 1} + \frac{z}{r} - \frac{h}{R} = 0, \quad (4)$$

где p – давление прессования; σ – нормальное осевое напряжение; τ – касательное напряжение; σ_s – предел текучести материала; $k = \sigma_s / \sqrt{3}$ – константа пластичности; $\eta = 1 - \xi$, ξ – коэффициент бокового давления; δ – относительная плотность прессовки; ε – относительное удлинение или сжатие; m – показатель степени уплотнения; β – угол пластического трения, определяемый из уравнения деформационного уплотнения (4); h – высота прессовки; z, r – независимые координаты.

Графики зависимостей, приведенные на рис. 3, 4, показывают, что с увеличением относительной плотности стальной и чугунной стружки общий уровень касательных напряжений по объему очага деформации снижается, в то время как нормальные напряжения и давление прессования непрерывно возрастают, что свидетельствует о непрерывной трансформации механической схемы уплотнения в схему всестороннего равномерного или гидростатического сжатия. Силы бокового контактного трения в подвижной матрице при незначительном относительном перемещении трущихся поверхностей ничтожно малы, что свидетельствует о более значимом и многократно превосходя-

щем влиянии величины нормальных напряжений на процесс уплотнения материала. Снижение величины касательных напряжений указывает на направление уплотнения материала в процессе брикетирования – от боковой поверхности матрицы к оси симметрии, при этом общий уровень касательных напряжений на периферии и у основания прессовки неизменно ниже, чем в центре и областях, прилегающих к прессующему пуансону. Соответственно для центральных областей брикета характерна некоторая остаточная пористость, которая по достижении среднего значения плотности 90–95 % практически не влияет на его эксплуатационные характеристики.

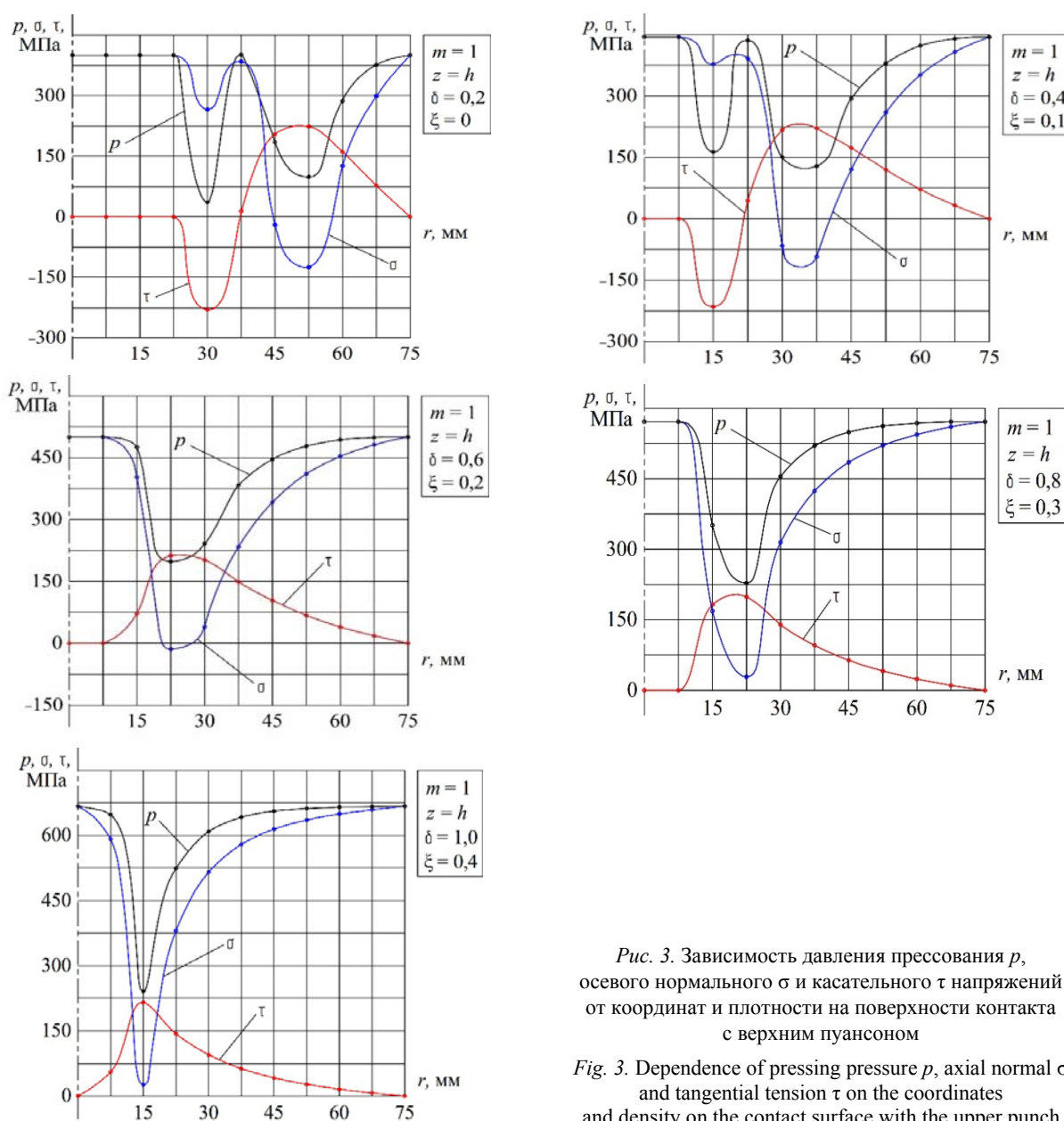


Рис. 3. Зависимость давления прессования p , осевого нормального σ и касательного τ напряжений от координат и плотности на поверхности контакта с верхним пуансоном

Fig. 3. Dependence of pressing pressure p , axial normal σ and tangential tension τ on the coordinates and density on the contact surface with the upper punch

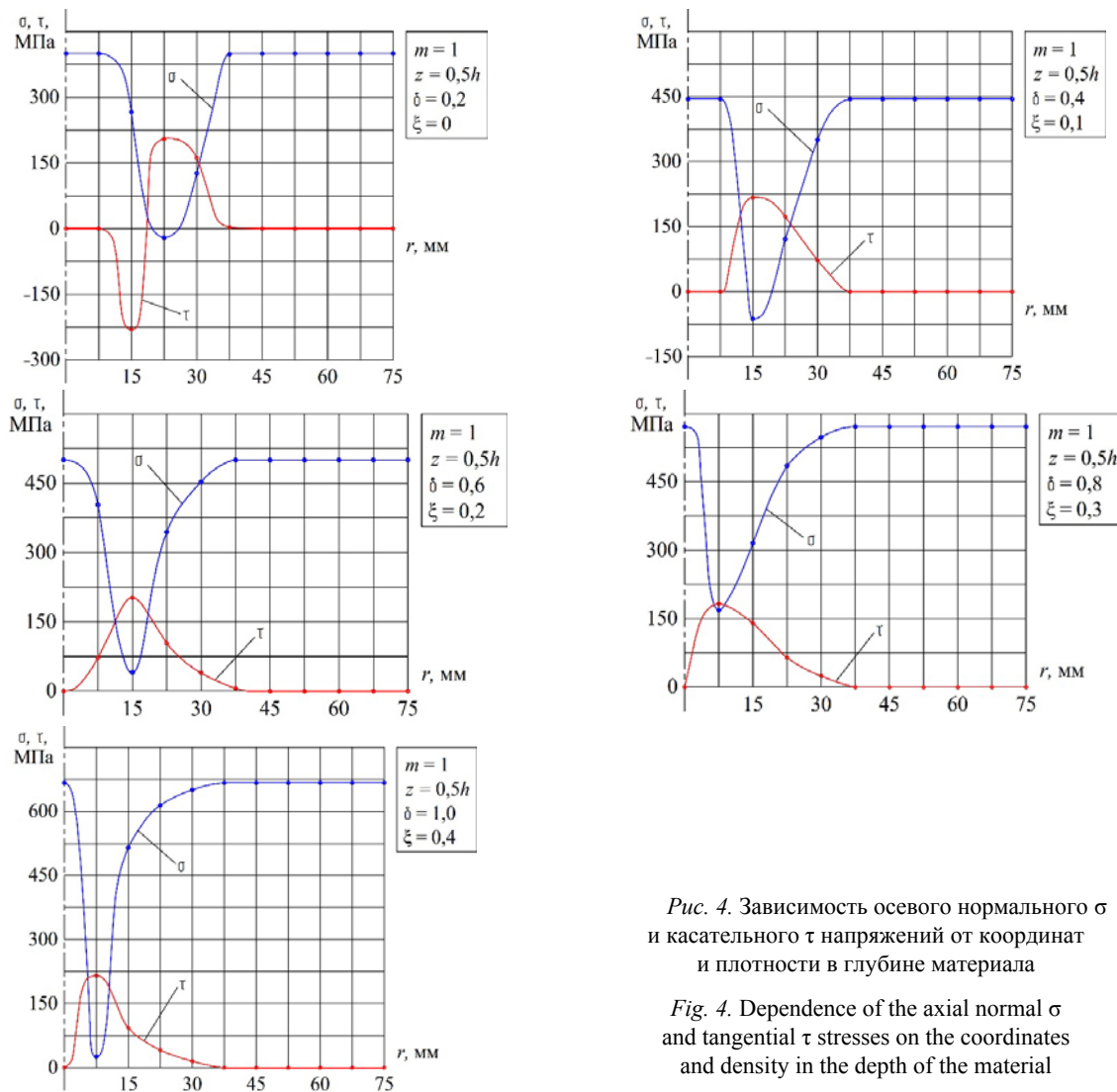


Рис. 4. Зависимость осевого нормального σ и касательного τ напряжений от координат и плотности в глубине материала

Fig. 4. Dependence of the axial normal σ and tangential τ stresses on the coordinates and density in the depth of the material

Результаты экспериментального исследования процесса брикетирования

Определение пористости брикетов проводили методом секущих. Для определения среднего размера пор проводили линии на изображении нетравленной поверхности. Затем подсчитывали размеры пор, попавших на линию, и их количество. Оценку среднего размера пор проводили по формуле

$$\bar{d} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (5)$$

где $\bar{d}$ – средний размер пор; x_1 – размер поры под номером 1; x_n – то же под номером n ; n – суммарное количество пор.

Пористость определяли по формуле:

$$\Pi = \frac{\sum l}{\sum L}, \quad (6)$$

где $\sum l$ – суммарная длина пор; $\sum L$ – то же линий.

На рис. 5 показан шлиф брикета из чугуна СЧ25 в его меридиональном сечении с указанием исследуемых участков 1–15 для измерения объемной пористости. Брикет получен под давлением 470 МПа при температуре 800 °С.

В табл. 1 приведены значения объемной пористости по номерам участков среза горяче-прессованного брикета.

Среднее значение пористости составляет 8,5 %, причем пористость по краям брикета 8,3 %, ближе к центру 8,7 %. Соответственно плотность по краям брикета выше, чем в сере-

дине, что соответствует выводам теоретического анализа.



Рис. 5. Шлиф брикета из чугуновой стружки СЧ25 с указанием номеров исследуемых участков для измерения объемной пористости

Fig. 5. Cast iron chip briquette СЧ25 with indication of the numbers of the studied areas for measuring volumetric porosity

Таблица 1
Значения объемной пористости по номерам участков среза горячепрессованного брикета

Values of volumetric porosity by numbers of sections of the cut of the hot-pressed briquette

№ изображения	Пористость, об. %	№ изображения	Пористость, об. %
1	8,3	9	8,7
2	8,3	10	8,6
3	8,3	11	8,5
4	8,4	12	8,4
5	8,5	13	8,3
6	8,6	14	8,3
7	8,7	15	8,3
8	8,7		
Среднее значение пористости, %		8,5	

Таким образом, брикетирование стружки в подвижной матрице приводит к более равномерному распределению плотности по объему брикета и, в конечном итоге, к меньшему значению пористости по сравнению с пористостью 13,3 % брикета, изготовленного при тех же условиях в пресс-форме с неподвижной матрицей [1]. Этот эффект достигается благодаря тому, что в процессе брикетирования прессуемый металл перемещается вместе с матрицей и в направлении перемещения матрицы.

Непрерывный рост давления прессования с увеличением плотности прессовки, согласно уравнению (1), соответствует закону сжатия пористой массы в замкнутом объеме. Синусоидальный характер изменения давления в зависимости от координаты (радиуса) r прессовки обусловлен синусоидальной зависимостью (2) касательного напряжения τ от угла пластического трения β в окружности пластичности (рис. 6), представляющей собой геометрическую интерпретацию условия пластичности Губера–Мизе-

са (1) для металлических пористых материалов. У основания прессовки на поверхности контакта с нижним опорным пуансоном ($z = 0$) величина касательных напряжений не зависит от координаты r , давление по всей площади контакта распределено равномерно.

Давление прессования снижается на 15–20 % по сравнению с аналогичными условиями прессования в неподвижной матрице [1]. Порошковые добавки металлического или неметаллического происхождения заполняют пустоты между более крупными фракциями стружки и таким образом повышают начальную плотность прессовки и градиент роста давления по мере увеличения плотности.



Рис. 6. Окружность пластичности

Fig. 6. Circle of plasticity

Как следует из диаграмм прессования, представленных на рис. 7–9, характер деформационного уплотнения и в целом уровень сопротивления деформированию зависят от исходного состояния материала: чем больше начальная плотность и предел текучести металла, тем интенсивнее нарастает давление прессования; чем выше пластичность металла, тем больше боковое давление и интенсивнее рост осевого давления.

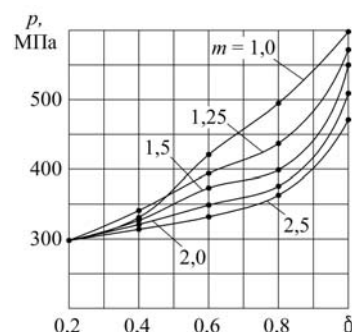


Рис. 7. Зависимость давления прессования от плотности и показателя степени уплотнения

Fig. 7. Dependence of pressing pressure on the density and the index of the degree of compaction

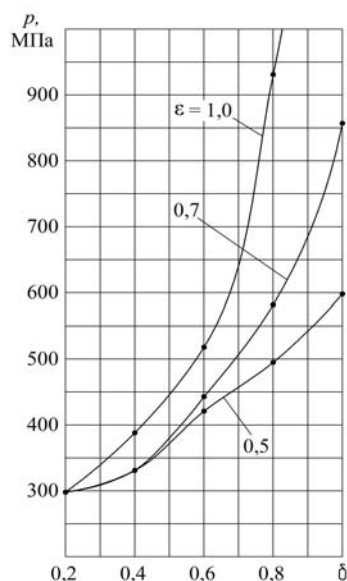


Рис. 8. Зависимость давления прессования от плотности и характеристики пластичности материала

Fig. 8. Dependence of pressing pressure on the density and plasticity characteristics of the material

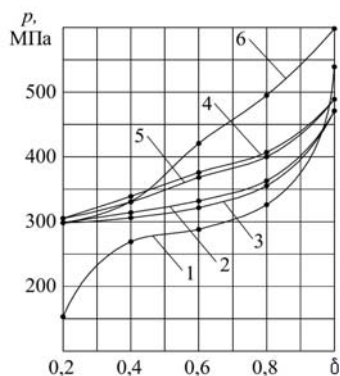


Рис. 9. Расчетные диаграммы прессования:

- 1 – стружка стали 45; 2 – то же стали 3Х15СГ;
3 – то же стали 3Х15СГ с порошком шлама (20 %);
4 – чугунная стружка СЧ25; 5 – стружка СЧ25
с добавкой кокса 3 %; 6 – ФМн78

Fig. 9. Calculated pressing diagrams:

- 1 – shavings of steel 45; 2 – shavings
of steel 3Х15СГ [ShKh15SG]; 3 – shavings
of steel 3Х15СГ [ShKh15SG] with slurry powder (20%);
4 – cast iron shavings СЧ25 [SCh25]; 5 – shavings СЧ25 [SCh25]
with the addition of coke 3 %; 6 – ФМн78 [FMn78]

Диаграмма прессования 1 пластичной среднеуглеродистой стали 45 обладает ярко выраженной площадкой текучести в отличие от малопластичных сталей 3Х15СГ, чугунной стружки СЧ25 и отсеков ферромарганца ФМн78. Появление в расчетной зависимости площадки текучести является следствием того, что на определенном этапе пластическое течение

металла происходит без существенного увеличения сопротивления деформированию. Математически это явление отображается условием пластичности, в которое входят прочностные и пластические характеристики металла и которое представляет собой функциональную зависимость напряженного состояния прессовки от степени деформационного уплотнения.

Характерной особенностью процесса брикетирования отходов черных металлов является большое различие величин бокового и осевого давлений прессования (рис. 10).

В отличие от жидкости, равномерно передающей давление во всех направлениях, в стружке на боковые стенки пресс-формы передается значительно меньшее давление, чем в направлении прессования. Причиной этому является наличие пористости деформируемого тела, которая в закрытой цилиндрической матрице приводит к преобладающему сжатию и пластическому течению металла в осевом направлении. Осевое давление при горячем брикетировании стальной токарной стружки в начале процесса в 27–32 раза больше бокового давления и в 2–3 раза – по окончании процесса. У чугунной стружки и ферросплавов это соотношение изменяется в пределах 13,6–2,2 раза.

Экспериментальное исследование в настоящей работе проводилось с целью проверки способности разработанной математической модели и соответственно созданного на ее основе метода расчета физически адекватно и точно отображать явления и закономерности процесса брикетирования в зависимости от схемы нагружения, свойств материала, температуры, давления и других технологических факторов. Наибольший интерес представляет оптимизация режимов брикетирования по критериям качества брикетов, износа инструмента, силовых и энергетических параметров. Основными критериями качества являются химический состав и плотность брикетов.

Установлено, что оптимальные значения давления прессования стружко-порошковых дисперсий черных металлов при температурах 700–850 °С изменяются в пределах 470–500 МПа, при этом среднее значение плотности брикета составляет 90–95 % плотности компактного материала того же химического состава. От плотности брикета зависят его прочность и способность противостоять воздействию окислительной среды в процессе плавки.

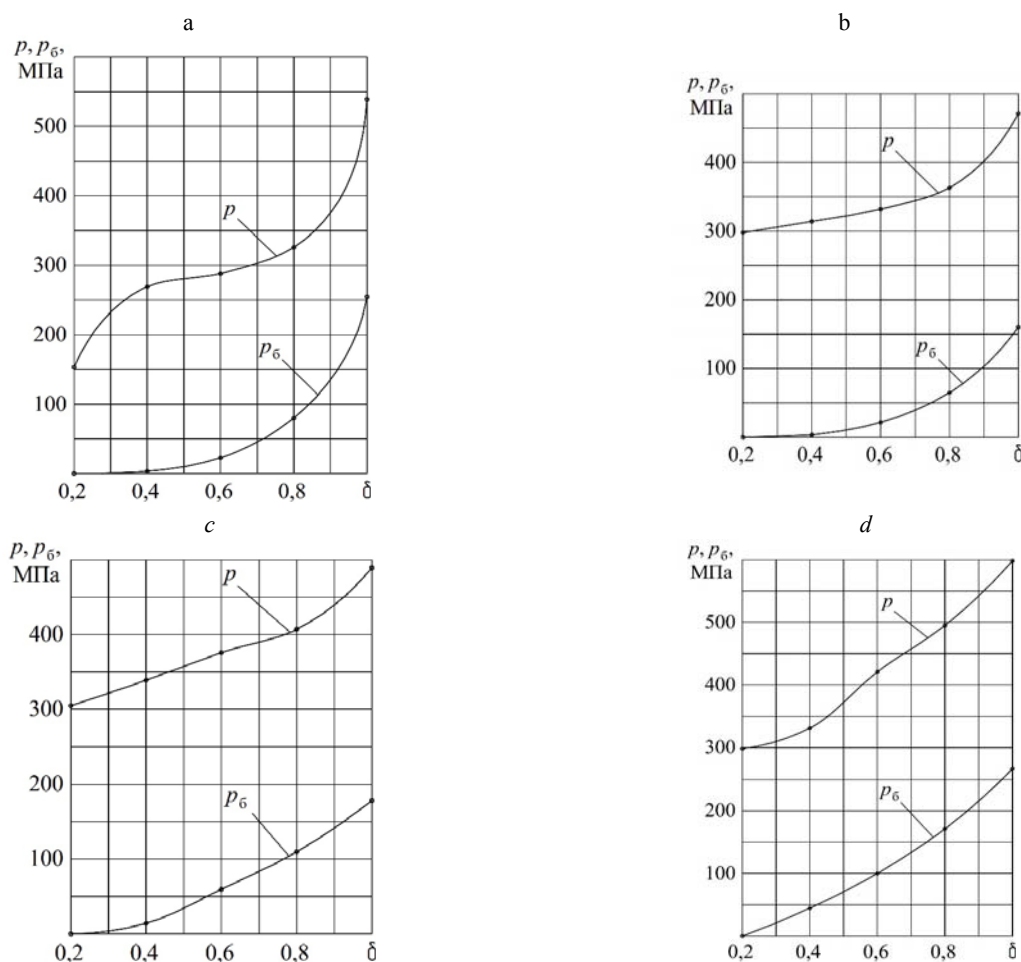


Рис. 10. Диаграммы осевого p и бокового p_6 давления прессования: а – стружка стали 45; б – то же ШХ15СГ; с – чугунная стружка СЧ25; d – отсев ферромарганца ФМн78

Fig. 10. Diagrams of axial p and lateral p_6 pressing pressure: а – shavings of steel 45; б – shavings of steel ШХ15СГ [ShKh15SG]; с – cast iron shavings СЧ25 [SCh25]; d – screening of ferromanganese ФМн78 [FMn78]

Горячепрессованные брикеты, полученные из вторичных черных металлов по указанным режимам брикетирования, полностью очищены от масляных загрязнений и СОЖ, не разрушаются при транспортировке, перегрузках и сбрасывании с высоты до 6 м. В процессе плавки они полностью погружены в расплав и сверху защищены от окисления слоем шлака.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных, соответствующих оптимальным режимам брикетирования, показал, что при правильном и достоверном определении реологических характеристик материала σ_s , ϵ , m достигается высокая сходимость расчетных и экспериментальных данных. Погрешность при определении энергосиловых параметров не превышает 12 %.

Применение в конструкции пресс-формы пневмоцилиндра с требуемым для получения плотного брикета ходом поршня с запрессован-

ной в него матрицей и использование в качестве упругого элемента сжатого воздуха, выдавливаемого в пневмосистему, обеспечивают высокую эксплуатационную стойкость пресс-формы. Ход прессующего пуансона и матрицы устанавливается в зависимости от требуемой степени сжатия прессовки, он не ограничивается конструктивными особенностями пресс-формы и не зависит от термомеханической усталости упругого элемента.

В связи с тем, что направления перемещения матрицы и прессовки совпадают, их относительное перемещение как трущихся поверхностей, а, следовательно, и износ матрицы минимизируются. Прессующий пуансон не входит в матрицу и перемещается с ней с одной и той же скоростью. Исключается износ кромок пуансона с образованием «тянущего» заусенца на прессовке.

Опорный пуансон также находится в благоприятных условиях нагружения при незна-

чительном воздействии сил бокового трения. Зазор между ним и стенками матрицы выбирается минимальным, достаточным для выталкивания готового брикета. Проникание мелких металлических частиц стружки (порошка) в зазор между стенками матрицы и опорного пуансона завершается просыпанием порошка в подпоршневую полость пневмоцилиндра. Периодическая чистка подпоршневой полости производится автоматически при открытии декомпрессионного клапана. Порошок выдувается из подпоршневой полости сжатым воздухом.

ВЫВОДЫ

1. Подводя итоги сказанному, можно констатировать, что технология горячего брикетирования вторичных черных металлов в подвижных матрицах в значительной степени превосходит известные аналоги по качеству брикетов, износу инструмента, силовым и энергетическим затратам.

2. В отличие от известных аналогов [1] в новой технологии проведение предварительной операции удаления СОЖ центрифугированием, термовибрационной очисткой и другими способами не требуется. СОЖ удаляется термической возгонкой, частично сжигается в топке печи, частично конденсируется в системе «мокрой» очистки.

3. Дробление стальной стружки на фракции до 15 мм необходимо для повышения ее сыпучести. От размера металлических частиц зависят насыпная плотность шихты и в конечном итоге плотность, размеры и масса готового брикета. Для чугуновой стружки, мелкофракционных отсеков ферросплавов, отработанной стальной и чугуновой дроби операция дробления не требуется. Весовые соотношения различных компонентов шихты устанавливаются, исходя из условий металлургического процесса плавки и заданного химического состава выплаваемого слитка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов, О. М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О. М. Дьяконов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
2. Получение высококачественного металлургического сырья из отходов металлообрабатывающего производства / Е. И. Марукович [и др.] // Металлургия машиностроения. 2020. № 2. С. 31–39.
3. Дьяконов, О. М. Брикетирование структурно-неоднородных пористых материалов / О. М. Дьяконов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2020.

Т. 65. № 2. С. 205–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-205-214>.

4. Дьяконов, О. М. Горячее прессование стружки и стружко-порошковых смесей / О. М. Дьяконов // Порошковая металлургия. 2010. Вып. 33. С. 25–35.
5. Дорофеев, Ю. Г. Использование брикетов из стружки для плавки металла / Ю. Г. Дорофеев, В. П. Матвеев, И. Н. Никитенко. М.: ГОСИНТИ, 1964. 61 с.
6. Дорофеев, Ю. Г. Получение брикетов из стружки и шлама / Ю. Г. Дорофеев [и др.] // Сталь. 1966. № 10. С. 964–967.
7. Дорофеев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов / Ю. Г. Дорофеев. М.: Наука, 1968. 120 с.
8. Лурье, Л. А. Брикетирование в черной и цветной металлургии / Л. А. Лурье. М.: Metallurgizdat, 1963. 324 с.
9. Равич, Б. М. Брикетирование в цветной и черной металлургии / Б. М. Равич. М.: Металлургия, 1975. 229 с.
10. Проблемы получения и использования брикетированных металлоотходов / Н. А. Свидуневич [и др.] // Литье и металлургия. 2003. № 3. С. 110–112. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2003-3-110-112>.

Поступила 20.06.2023

Подписана в печать 22.08.2023

Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Dyakonov O. M. (2012) *Complex Processing of Chips and metal-containing sludge*. Minsk, Tekhnologiya Publ. 262 (in Russian).
2. Marukovich E. I., Panteleenko F. I., D'yakonov O. M., Litvinko A. A., Sereda V. Yu. (2020) Obtaining High-quality metallurgical Raw Materials from Wastes of Metal-processing Production. *Metallurgiya Mashinostroyeniya = Metallurgy of Machinery Building*, (2), 31–39 (in Russian).
3. Dyakonov O. M. Briquetting of Structurally Inhomogeneous Porous Materials. *Vestsi Natsyynal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series*, 2020, 65 (2), 205–214 <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-205-214> (in Russian).
4. Dyakonov O. M. (2010) Hot Pressing of Chips and Chip-powder Mixtures. *Poroshkovaya Metallurgiya = Powder Metallurgy*, (33), 25–35 (in Russian).
5. Dorofeev Yu. G., Matveev V. P., Nikitenko I. N. (1964) *Using Chip Briquettes for Melting Metal*. Moscow, Publishing House of State Research Institute of Scientific and Technical Information. 61 (in Russian).
6. Dorofeev Yu. G. [et al.] (1966) Obtaining Briquettes from Chips and Sludge. *Stal [Steel]*, (10), 964–967 (in Russian).
7. Dorofeev Yu. G. (1968) *Dynamic hot Pressing of Porous Materials*. Moscow, Nauka Publ. 120 (in Russian).
8. Lurie L. A. (1963) *Briquetting in Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy*. Moscow, Metallurgizdat Publ. 324 (in Russian).
9. Ravich B. M. (1975) *Briquetting in Non-Ferrous and Ferrous Metallurgy*. Moscow, Metallurgiya Publ. 229 (in Russian).
10. Svidunovich N. A., Pisarenko L. Z., Kuis D. V., Bobrov J. P. (2003) Problems of Production and Using of Briquetted Metal Discard. *Litiya i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (3), 110–112. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2003-3-110-112> (in Russian).

Received: 20.06.2023

Accepted: 22.08.2023

Published online: 29.09.2023

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА DEFORMATION IN SOLID MECHANICS

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-376-386>

УДК 517.97:615.47

О возможности применения программы COMSOL Multiphysics для топологической оптимизации пластин для остеосинтеза

Докт. техн. наук Д. А. Степаненко¹⁾,
асп. И. Мудинов¹⁾, студенты В. А. Охремчик¹⁾, А. А. Билейчик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье описана методика топологической оптимизации пластин для остеосинтеза, применяемых для внутренней фиксации переломов костей. Представленная методика основана на применении метода плотности и коммерчески доступного программного обеспечения COMSOL Multiphysics, предназначенного для моделирования с помощью метода конечных элементов. Проведен сравнительный анализ характеристик (продольной жесткости, объема и максимального напряжения, по Мизесу) базовой конструкции пластины и двух оптимизированных вариантов. Установлено, что оптимизированные варианты обеспечивают снижение объема пластины на 49–54 %. При этом продольная жесткость уменьшается на 43–53 %, что является положительным эффектом с точки зрения минимизации эффекта экранирования напряжений. Оптимизированные варианты конструкции имеют близкие значения продольной жесткости и максимального напряжения, по Мизесу, однако в одном из них возникает прогиб продольных сегментов, приводящий к повышению полной энергии деформации, которая используется в качестве целевой функции при оптимизации. В варианте 2 конструкции прогиб продольных сегментов пластины исключается за счет наличия поперечной перемычки между ними и полная энергия деформации принимает более низкое значение. Вариант конструкции без перемычки требует дополнительного исследования, так как сдвиговые напряжения, возникающие в результате контактного взаимодействия продольных сегментов пластины с костью, могут оказывать положительное влияние на регенерацию костной ткани.

Ключевые слова: пластины для остеосинтеза, метод конечных элементов, COMSOL Multiphysics, топологическая оптимизация, продольная жесткость, эффект экранирования напряжений

Для цитирования: О возможности применения программы COMSOL Multiphysics для топологической оптимизации пластин для остеосинтеза / Д. А. Степаненко [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 376–386. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-376-386>

On Possibility of Application of COMSOL Multiphysics Software for Topological Optimization of Osteosynthesis Plates

D. A. Stepanenko¹⁾, I. Mudinov¹⁾, V. A. Akhremchyk¹⁾, H. A. Bileichyk¹⁾

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

Abstract. The paper describes a technique of topological optimization of osteosynthesis plates used for internal fixation of bone fractures. The proposed technique is based on the application of the density method and the commercially available

Адрес для переписки

Степаненко Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-01
stepd@tut.by

Address for correspondence

Stepanenko Dmitry A.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-01
stepd@tut.by

COMSOL Multiphysics software intended for finite element modeling. A comparative analysis of the characteristics (axial stiffness, volume and maximum von Mises stress) is presented for initial design of the plate and two optimized variants of the design. It has been established that the optimized variants provide a reduction in the plate volume by 49–54 %. In this case, the axial stiffness decreases by 43–53 %, which is a positive effect in terms of minimizing the effect of stress shielding. The optimized variants of the design possess close values of axial stiffness and maximum von Mises stress, however, in one of them, deflection of the axial segments occurs, resulting in an increase in the total strain energy, which is used as an objective function during optimization. In the variant 2 of the design, the deflection of the longitudinal segments of the plate is eliminated due to the presence of a transverse bridge between them, and the total strain energy takes on a lower value. The variant of the design without a bridge should be additionally studied, since shear stresses resulting from the contact interaction of the longitudinal segments of the plate with the bone can have a positive effect on regeneration of the bone tissue.

Keywords: osteosynthesis plates, finite element method, Comsol Multiphysics, topological optimization, axial stiffness, stress shielding effect

For citation: Stepanenko D. A., Mudinov I., Akhremchik V. A., Bileichyk H. A. (2023) On Possibility of Application of COMSOL Multiphysics Software for Topological Optimization of Osteosynthesis Plates. *Science and Technique*. 22 (5), 376–386. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-376-386> (in Russian)

Общие сведения о методах остеосинтеза

Переломы костей являются одним из самых распространенных видов травм. Так, в 2019 г. общее число случаев переломов в мире составило около 178 млн [1]. Существующие методы лечения переломов можно разделить на консервативные, например наложение гипсовых повязок после закрытой репозиции костных отломков, и хирургические. Разновидность хирургических методов – накостный (экстремедуллярный) остеосинтез, при котором отломки фиксируются в правильном взаимном положении, достигнутом путем репозиции, с помощью пластин-фиксаторов, соединяемых с костью шурупами или винтами. Простейший вариант пластин для остеосинтеза – пластины с круглыми отверстиями, однако они редко используются в настоящее время, так как не способны обеспечить компрессию отломков и по этой причине должны использоваться в сочетании с внешним компрессионным устройством. В динамических компрессионных пластинах (dynamic compression plate, DCP) используются отверстия особой формы, имеющие наклонный цилиндрический участок, при взаимодействии которого со сферической опорной поверхностью крепежного винта возникает горизонтальное перемещение пластины и связанного с ней отломка кости, приводящее к закрытию перелома и компрессии отломков [2]. Важным фактором, способствующим повышению эффективности экстремедуллярного остеосинтеза, является сохранение целостности сосудистой системы надкостницы (периоста). Для решения этой проблемы разработаны динамические компрессионные пластины с ограниченным контактом (limited contact DCP, LC-DCP) и точечным контактом (point contact DCP, PC-DCP) [3].

В динамических компрессионных пластинах с ограниченным контактом на нижней поверхности пластины, контактирующей с периостом, создается профиль, способствующий снижению площади контакта, что, в свою очередь, приводит к стимуляции ангиогенеза и повышению плотности кровеносных сосудов [4]. В пластинах с точечным контактом профиль нижней поверхности обеспечивает формирование по обе стороны от крепежных отверстий заостренных выступов, обеспечивающих контакт пластины с периостом, близкий по характеру к точечному. В блокируемых компрессионных пластинах (locking compression plate, LCP) используются комбинированные отверстия, позволяющие применять как стандартные крепежные, так и блокирующие винты, головка которых имеет коническую резьбу, ввинчиваемую в резьбу крепежного отверстия, что обеспечивает стабильность углового положения пластины.

Эффект экранирования напряжений и способы его минимизации

Применение пластин для хирургического лечения переломов может приводить к разгрузке (экранированию) кости от механических напряжений, действующих на нее у здорового человека; это явление называют эффектом экранирования напряжений (stress shielding) [5]. В результате экранирования напряжений возникает остеопения – снижение минеральной плотности и прочности костной ткани [6]. Данный негативный эффект объясняется законом Вольфа, согласно которому микроархитектура, свойства и общая морфология костной ткани адаптируются к изменениям действующих на нее внешних нагрузок [7]. В основу за-

кона положено наблюдение немецкого хирурга Юлиуса Вольфа, установившего, что пучки трабекул в бедренной кости направлены вдоль траекторий главных напряжений [8]. Более глубокое понимание механизмов адаптации костной ткани к внешним нагрузкам дает так называемая ютская парадигма (Utah paradigm), согласно которой напряжения, возникающие в кости под действием внешней нагрузки, регистрируются механочувствительными клетками-остеоцитами и сравниваются ими с предписанными пороговыми значениями, ниже из которых соответствует началу процесса разрушения (резорбции) костной ткани при недостаточном уровне нагрузок, а верхнее – началу процесса формирования дополнительной костной ткани при избыточном уровне нагрузок [9]. Остеоциты преобразуют механические напряжения в биологические сигналы, управляющие активностью остеобластов, участвующих в процессе формирования костной ткани путем преобразования остеобластов в остеоциты, и остеокластов, участвующих в процессе резорбции путем растворения минеральной составляющей и разрушения коллагена [10]. Эффект экранирования напряжений нежелателен на заключительных стадиях процесса сращения перелома, однако играет положительную роль на его начальном этапе, так как высокая жесткость пластины обеспечивает надежную фиксацию отломков кости. Идеален вариант, когда жесткость пластины и соответственно степень экранирования напряжений постепенно снижаются с течением времени по мере сращения перелома. Реализация такого сценария возможна при использовании пластин из биodeградируемых материалов, например синтетических полимеров и магния [11], но в этом случае существует проблема согласования скорости деградации материала со скоростью сращения перелома. Преимуществом использования биodeградируемых материалов является отсутствие необходимости в проведении повторного хирургического вмешательства для извлечения пластины. Идея изменения жесткости пластины по мере сращения перелома положена в основу концепции «динамизируемых» пластин [12], однако в отличие от пластин из биodeградируемых материалов процесс изменения жесткости динамизируемых пластин управляем и характеризуется скачкообразным снижением жесткости в определенный момент времени, выбор

которого зависит от скорости сращения перелома. Конструктивно динамизируемая пластина состоит из двух частей, возможность взаимного осевого перемещения которых определяется положением подвижного фиксатора: на начальных стадиях сращения перелома фиксатор находится в положении, исключающем взаимное перемещение частей пластины, что обеспечивает высокую жесткость, а на заключительной стадии переводится с помощью привода в положение, допускающее взаимное перемещение, соответствующее низкой жесткости. Использование магнитного привода позволяет управлять положением фиксатора неинвазивным образом. При использовании принципа селективного экранирования напряжений пластина проектируется таким образом, чтобы она обладала высокой жесткостью по отношению ко всем видам деформаций (кручение и изгиб), за исключением деформации растяжения-сжатия [13]. Такая пластина будет обеспечивать возможность осевых микроперемещений отломков кости и частичной передачи внешних нагрузок на кость в осевом направлении, исключая при этом взаимное смещение отломков по остальным степеням свободы. Технологически подобная пластина может быть реализована за счет использования анизотропных композиционных материалов, например ламинатов, состоящих из слоев «углеродное волокно/эпоксидная смола» и «льняное волокно/эпоксидная смола» [13].

Топологическая оптимизация имплантатов и способы ее реализации

В настоящее время для создания оптимальных конструкций ортопедических имплантатов широко используется метод топологической оптимизации [14–18]. Топологическая оптимизация распределяет материал в изделии таким образом, чтобы обеспечить минимизацию некоторой целевой функции, характеризующей эффективность работы изделия, при заданных нагрузках, граничных условиях и ограничениях. В отличие от оптимизации формы, в которой возможные варианты конструкции формируются из исходного путем деформации существующих границ, топологическая оптимизация допускает формирование новых границ, например отверстий в изначально сплошном материале, то есть допускает изменение тополо-

гии. Результатом топологической оптимизации обычно является создание облегченной по массе конструкции изделия, не уступающей по своим характеристикам базовой конструкции из сплошного материала. Классический пример использования топологической оптимизации – проектирование фермы Мессершмитта–Бёлкова–Блома (Messerschmitt–Bölkow–Blohm beam, MBV beam), обладающей минимальной изгибной податливостью при минимальной массе. В этом случае топологическая оптимизация на сплошной прямоугольной области, соответствующей сплошной балке, приводит к созданию облегченной конструкции в виде решетчатой фермы. Минимизация податливости и минимизация массы являются взаимно конфликтными целями, так как снижение массы путем частичного удаления материала приводит к увеличению податливости, однако при некотором предписанном значении массы топологически оптимизированная конструкция будет обладать минимальной для данного значения массы податливостью (большей, чем податливость исходной конструкции). С точки зрения минимизации эффекта экранирования напряжений, повышение податливости будет положительным эффектом. Существует несколько подходов к решению задач топологической оптимизации: эволюционная структурная оптимизация, метод плотности и метод гомогенизации.

Метод эволюционной структурной оптимизации основан на постепенном удалении элементов из разбитой на дискретные элементы области оптимизации с использованием определенного критерия удаления последних, простейшим вариантом которого является критерий, основанный на уровне напряжений: элементы, для которых напряжение, по Мизесу, оказывается ниже порогового значения, заданного в процентах от максимального напряжения, считаются недостаточно эффективно используемыми и удаляются из конструкции [19]. Напряжения обычно рассчитываются с помощью метода конечных элементов. Процесс продолжается итеративным образом до тех пор, пока в конструкции не останется элементов, удовлетворяющих критерию удаления.

При использовании метода плотности область оптимизации разбивается на конечные элементы, каждому из которых в конечной оптимизированной топологии может соответство-

вать нулевое значение безразмерной плотности $\rho = 0$ (отсутствие материала) или единичное значение плотности $\rho = 1$ (наличие материала). Недостатком такой дискретной формулировки является то, что она приводит к некорректно поставленной задаче. Для решения этой проблемы была предложена модель сплошного изотропного материала со штрафованием промежуточных плотностей (SIMP, Solid Isotropic Material with Penalization for intermediate densities), в которой плотность может принимать непрерывно изменяющиеся значения от $\rho_{\min} > 0$ до $\rho_{\max} = 1$ [20], а модуль упругости определяется выражением

$$E = E_{\min} + (E_0 - E_{\min})\rho^p,$$

где $p > 1$ – целочисленный штрафной коэффициент; E_0 – модуль упругости сплошного материала; $E_{\min}$ – значение модуля упругости при $\rho = \rho_{\min}$.

При использовании такой модели подавляющее большинство элементов в конечной топологии будет иметь плотность $\rho = \rho_{\min}$ или $\rho = 1$.

Использование метода гомогенизации рационально при изготовлении оптимизированного изделия из композиционных материалов, например ламинатов и ячеистых композитов (cellular materials), физические свойства которых (упругие свойства и плотность) могут регулироваться за счет изменения отношения χ объемов фаз в композите. Развитие данного метода тесно связано с внедрением в производство аддитивных технологий, из которых наиболее важную роль в изготовлении имплантатов играют селективная лазерная плавка (selective laser melting, SLM) и электронно-лучевая плавка (electron beam melting, EBM) [21]. Использование ячеистых композитов в постоянных имплантатах дает такие преимущества, как возможность врастания костной ткани и потенциальная возможность васкуляризации имплантата. При использовании метода гомогенизации геометрия изделия остается неизменной, а определению подлежит оптимальное распределение свойств материала в нем. Для различных значений плотности ρ , соответствующих изменению величины отношения χ объемов фаз в композите, предварительно рассчитываются эквивалентные значения упругих свойств (модулей продольной и сдвиговой упругости и коэффициента Пуассона), которые затем

используются для определения напряженно-деформированного состояния изделия в процессе оптимизации. Эквивалентные значения упругих свойств будут зависеть от реальных упругих свойств входящих в состав композита фаз, отношения x объемов фаз, а в случае ячеистых композитов – от геометрии элементарной ячейки.

Особенности топологической оптимизации, основанной на применении метода плотности. При решении задач топологической оптимизации методом плотности могут возникать численные неустойчивости, примерами которых являются паттерны типа «шахматная доска» (checkerboard patterns) [22] и сеточная зависимость решения. «Шахматная доска» представляет собой периодический двумерный паттерн в виде чередующихся областей высокой $\rho_{\max}$ и низкой $\rho_{\min}$ плотности, что соответствует среднему значению плотности $\rho = (\rho_{\min} + \rho_{\max})/2$. Сеточная зависимость представляет собой зависимость оптимизированной топологии от параметров сетки конечных элементов, используемой при решении задачи. Для подавления численных неустойчивостей используется фильтрация плотности с помощью фильтров нижних пространственных частот [23]. Радиус фильтра r_f (величина, обратно пропорциональная пространственной частоте среза) должен быть не меньше максимального размера элементов сетки. Радиус фильтра является параметром, определяющим минимальный возможный размер конструктивных элементов оптимизированного изделия, поэтому он должен выбираться с учетом разрешающей способности технологического оборудования, которое предполагается использовать для изготовления конструкции. Один из существующих подходов к фильтрации плотности – использование фильтра Гельмгольца, суть которого состоит в сведении задачи фильтрации к решению дифференциального уравнения типа Гельмгольца в частных производных [24]. Математически задача фильтрации описывается интегралом свертки между нефильтрованным полем плотности и импульсной характеристикой фильтра. В то же время, задача решения неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных также сводится к интегралу свертки: решение уравнения представляется в виде свертки неоднородного члена с функцией Грина. Учитывая математическую эквивалентность

двух упомянутых задач, фильтрация может быть сведена к решению дифференциального уравнения с функцией Грина, вид которой допускает ее использование в качестве импульсной характеристики фильтра нижних частот. Удобство такого подхода состоит в том, что дифференциальные уравнения в частных производных эффективно решаются с помощью метода конечных элементов, являющегося основным инструментом топологической оптимизации.

Идеальное решение задачи топологической оптимизации должно содержать только черные (с плотностью $\rho_{\min}$) и белые (с плотностью $\rho_{\max}$) элементы, однако из-за непрерывного изменения плотности реальное решение будет содержать серые элементы с промежуточными значениями плотности, реализация которых при изготовлении изделия невозможна, так как они не могут быть интерпретированы в рамках бинарной классификации «отсутствие материала/наличие материала». Для решения этой проблемы может использоваться метод проецирования плотности, в котором на плотность дополнительно воздействуют проекционным фильтром, математически описываемым с помощью регуляризованной (сглаженной) функции Хевисайда [25], например гиперболическим тангенсным фильтром:

$$\rho_p = (\text{th}(\beta(\rho_f - \rho_\beta)) + \text{th}(\beta\rho_\beta)) / (\text{th}(\beta(1 - \rho_\beta)) + \text{th}(\beta\rho_\beta)), \quad (1)$$

где ρ_p – значение плотности после проецирования; ρ_f – фильтрованное значение плотности; ρ_β – пороговое значение плотности (обычно принимается равным 0,5); β – коэффициент фильтра (обычно принимает целочисленные значения от 1 до 8).

При использовании выражения (1) разрыв функции Хевисайда заменяется участком, на котором она плавно возрастает от нуля до единицы со скоростью, зависящей от коэффициента β . При увеличении коэффициента β (1) приближается по форме к функции Хевисайда, которая ставит единицу в соответствие всем значениям, превышающим ρ_β , и нуль – всем значениям, меньшим ρ_β , то есть дает только черные и белые элементы. Таким образом, с увеличением коэффициента β уменьшается количество серых элементов, однако при повышении β ухудшается сходимость вычислений. Данное противоречие решается путем

продолжения решения по параметру β (beta-continuation): вначале ищется решение задачи оптимизации, соответствующее малому значению β (нерезкому проецированию), например: $\beta = 1$, при котором вычисления имеют хорошую сходимость, но дают топологию с большим числом серых элементов, а затем полученное решение используется в качестве начального приближения для поиска уточненного решения с более высоким значением β (более резким проецированием). Уточненное решение будет содержать меньшее число серых элементов, а сходимость процесса будет удовлетворительной благодаря использованию нетривиального начального приближения. При необходимости процесс повторяется для ряда значений β .

Математически задача топологической оптимизации формулируется следующим образом:

$$\min: c(\mathbf{p}) = \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{u}; \quad (2)$$

$$\text{s.t.}: \mathbf{K}(\mathbf{p})\mathbf{u} = \mathbf{f}; \quad (3)$$

$$V = \sum \rho_i v_i \leq V_c; \quad (4)$$

$$0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq 1, \quad (5)$$

то есть состоит в минимизации целевой функции (2), представляющей собой работу $c(\mathbf{p})$ упругих сил, при ограничениях (3)–(5).

Минимизация работы упругих сил автоматически влечет за собой минимальное значение податливости. Работа упругих сил зависит от вектора $\mathbf{u}$ узловых перемещений и вектора $\mathbf{f}$ узловых сил. Ограничения представляют собой условие статического равновесия (уравнение (3)), где $\mathbf{K}$ – глобальная матрица жесткости, ограничение объема (уравнение (4)), где V_c – максимально допустимое значение объема V , v_i – объем i -го конечного элемента, и ограничение диапазона допустимых значений плотности (уравнение (5)). В качестве исходных данных обычно указывается максимально допустимое значение относительного объема V/V_0 , где $V_0 = \sum v_i$ – начальный объем.

Реализация топологической оптимизации с помощью программы COMSOL Multiphysics. Для решения задачи топологической оптимизации пластин для остеосинтеза с помощью программы COMSOL Multiphysics использовалась двумерная геометрическая модель, представленная на рис. 1.

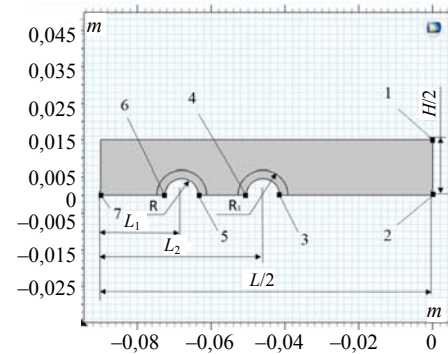


Рис. 1. Геометрическая модель базовой конструкции пластины

Fig. 1. Geometric model of the initial design of the plate

Учитывая геометрическую симметрию задачи, рассматривалась четверть пластины с наложением шарнирно-подвижных граничных условий (Roller Constraints) на границы 1–2, 2–3, 4–5 и 6–7. Геометрические параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры модели пластины

Geometric parameters of plate model

Обозначение параметра	Описание параметра	Значение параметра, мм
L	Длина пластины	180
H	Ширина пластины	30
d	Толщина пластины	3
R	Радиус отверстий	4,5
R_1	Радиус прилегающих к отверстиям кольцевых областей	6,75
L_1	Координата центров отверстий	22
L_2	Координата центров отверстий	44

В качестве материала был задан титановый сплав марки 21S – метастабильный β -сплав титана с химическим составом Ti–15Mo–3N–3Al–0,2Si (в весовых процентах).

Так как расположение и форма крепежных отверстий в пластине должны оставаться неизменными на протяжении процесса оптимизации, отверстия были окружены прилегающими к ним кольцевыми областями, которые описаны в модели с помощью опции Prescribed Material, накладывающей на данные области ограничение $\rho = 1$. Максимальный размер конечных элементов задан равным 0,75 мм (1/20 от поперечного размера $H/2$ модели), а минимальный размер 0,375 мм. Параметры процесса топологической оптимизации приведены в табл. 2.

Параметры процесса топологической оптимизации
Topological optimization process parameters

Параметр	Описание в COMSOL	Значение
Радиус фильтра r_f	Filter radius R_{min}	1,5 мм
Коэффициент проекционного фильтра β	Projection slope β	{2, 4, 6, 8}
Пороговое значение плотности для проекционного фильтра ρ_β	Projection point θ_β	0,5
Штрафной коэффициент p	SIMP exponent p_{SIMP}	{1, 2, 3, 4}
Минимальное значение плотности ρ_{min}	Minimum penalized volume fraction θ_{min}	10^{-3} (значение по умолчанию)
Максимально допустимое значение относительного объема V/V_0	Upper bound of comp1.dtopol.theta_avg	0,5

Переменная comp1.dtopol.theta_avg представляет собой среднее значение плотности после оптимизации и численно совпадает с величиной V/V_0 .

В качестве целевой функции (2) в COMSOL Multiphysics используется глобальная переменная comp1.solid.Ws_tot, представляющая собой полную энергию деформации.

Для продолжения решения по параметру β использовалась параметрическая прогонка (Parametric Sweep) с применением опции Reuse Solution from Previous Step (использование решения с предыдущего шага) с параметрами $\beta \in \{2, 4, 6, 8\}$, $p \in \{1, 2, 3, 4\}$, то есть вначале решалась задача оптимизации без штрафования промежуточных плотностей ($p = 1$) с нерезким проецированием ($\beta = 2$), а затем полученное решение использовалось при построении уточненных решений с постепенным усилением штрафования и резкости проецирования.

Фильтрация производилась с помощью фильтра Гельмгольца, а проецирование – с помощью гиперболического тангенсного фильтра.

При моделировании к наружным (по отношению к поперечной оси у симметрии пластины) частям контуров крепежных отверстий прикладывалась нагрузка $F_x = -35$ Н. В силу использования линейной модели упругости величина приложенной нагрузки не влияет на результаты топологической оптимизации.

В COMSOL Multiphysics используются четыре переменные плотности, которые могут использоваться для отображения результатов оптимизации:

1) θ_c (comp1.dtopol.theta_c, control material volume factor) – исходная плотность ρ (до фильтрации, проецирования и штрафования);

2) θ_f (comp1.dtopol.theta_f, filtered material volume factor) – фильтрованная плотность ρ_f ;

3) θ (comp1.dtopol.theta, output material volume factor) – плотность ρ_p после проецирования;

4) θ_p (comp1.dtopol.theta_p, penalized material volume factor) – плотность после штрафования.

Результаты и их обсуждение

В результате оптимизации получено распределение плотности θ_p , представленное на рис. 2.



Рис. 2. Расчетное распределение плотности θ_p

Fig. 2. Calculated distribution of density θ_p

Как видно из рисунка, в оптимизированной топологии присутствуют серые элементы, что требует применения бинарной классификации для получения черно-белого дизайна. Классификация выполнялась с помощью программы Mathcad, для чего расчетные значения плотности θ_p на регулярной сетке с шагом 0,1 мм экспортировались в текстовый файл, а затем импортировались в Mathcad в виде матрицы. Элементы матрицы трансформировались в целочисленный формат со значениями от 0 (сплошной материал) до 255 (отсутствие материала), что позволяло визуализировать матрицу в виде полутонового BMP-изображения. При этом учитывалось, что в точках сетки, лежащих в областях крепежных отверстий, плотность принимает значение NaN (нечисловое значение), так как данные области не входят в область оптимизации. В трансформированной матрице значения NaN заменялись значениями 255. Рис. 3 иллюстрирует влияние порога классификации на ее результаты.

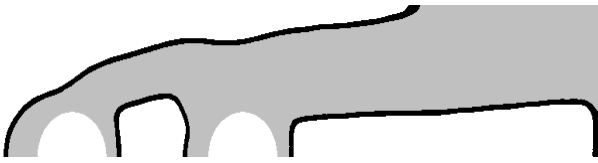


Рис. 3. Влияние порога классификации на ее результаты
Fig. 3. Effect of threshold on the results of classification

Серая область соответствует оптимизированной топологии пластины при пороге классификации 50 (вариант 1), а черная область соответствует дополнительному объему, возникающему при повышении порога классификации до 200 (вариант 2). Как видно из рисунка, вариант 2 отличается от варианта 1 наличием тонкой перемычки, связывающей между собой верхний и нижний продольные сегменты пластины. Форма наружного контура оптимизированной пластины и формы возникающих при оптимизации дополнительных отверстий описывались таблицами координат принадлежащих им точек, которые извлекались из матрицы с помощью программы Mathcad. На основе полученных таблиц геометрия оптимизированных пластин представлялась в COMSOL Multiphysics интерполяционными кривыми (рис. 4).

Альтернативным вариантом построения геометрических моделей оптимизированных пла-

стин является преобразование классифицированного BMP-изображения в векторный формат DXF с помощью коммерчески доступных конвертеров, например программы Scan2CAD.

В целях сравнительного анализа характеристик базовой конструкции пластины и двух вариантов, полученных в результате топологической оптимизации, проводился статический анализ всех трех вариантов конструкции. Граничные условия, нагрузки, свойства материала и параметры сетки сохранялись такими же, как и при топологической оптимизации.

Результаты сравнительного анализа характеристик различных вариантов конструкции пластины представлены в табл. 3.

Как видно из таблицы, объем пластины уменьшается в результате оптимизации на 49–54 %, а продольная жесткость – на 43–53 %, что является положительным эффектом с точки зрения снижения степени экранирования напряжений. Отрицательный фактор, с точки зрения прочности пластины, – повышение максимального напряжения, по Мизесу, составляющее 19–27 % по отношению к базовой конструкции. Как видно, вариант 1 не является оптимальным в терминах полной энергии деформации, однако он представляет интерес с точки зрения характера возникающих деформаций (рис. 5).

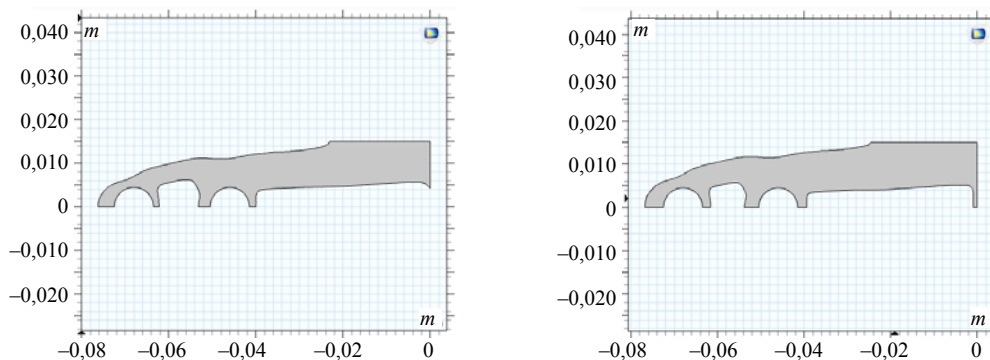


Рис. 4. Геометрические модели оптимизированных пластин

Fig. 4. Geometric models of optimized plates

Таблица 3

Характеристики различных вариантов конструкции пластины

Characteristics of various plate designs

Вариант конструкции	Характеристика			
	Продольная жесткость, кН/мм	Объем, см ³	Максимальное напряжение, по Мизесу, МПа	Полная энергия деформации, мкДж
Базовый	71,4	15,4	7,34	132,4
Вариант 1 (без перемычки)	33,8	7,1	9,32	240,4
Вариант 2 (с перемычкой)	41,0	7,9	8,72	198,8

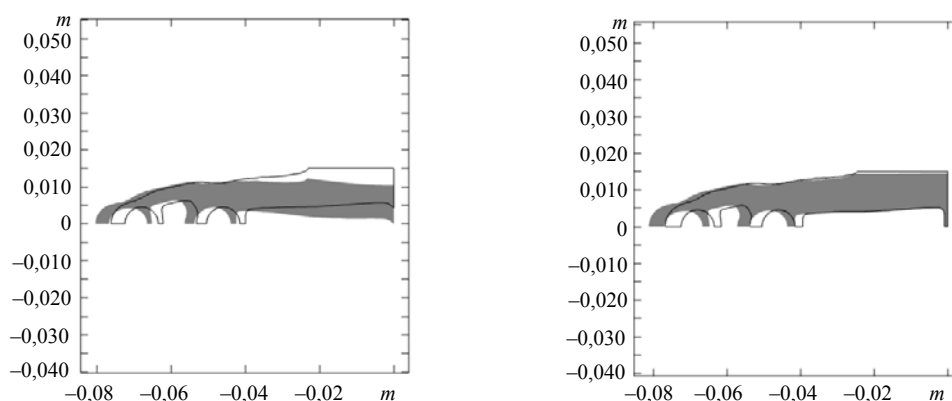


Рис. 5. Деформированная форма оптимизированных пластин

Fig. 5. Deformed shape of optimized plates

Как видно из рисунка, в варианте 1 конструкции возникает поперечная деформация (прогиб) продольных сегментов пластины, величина которой сопоставима с величиной продольной деформации. Это способствует повышению полной энергии деформации по сравнению с вариантом 2, в котором прогиб исключается за счет наличия перемычки. С точки зрения продольной жесткости и максимального напряжения, по Мизесу, варианты 1 и 2 конструкции сопоставимы: вариант 1 обладает несколько меньшей жесткостью, но демонстрирует более высокий уровень напряжений. В связи с этим представляет интерес исследование влияния прогибов пластины, возникающих в варианте 1 конструкции, на процесс сращения перелома: с учетом закона Вольфа сдвиговые напряжения, возникающие в результате контактного взаимодействия продольных сегментов пластины при их прогибе с костью, могут положительно влиять на регенерацию костной ткани, однако эта гипотеза требует экспериментальной проверки.

Качественно оптимизированная топология пластин согласуется с результатами, полученными другими исследователями [18, 26]. В частности, авторами работы [18] с помощью метода плотности спроектированы оптимизированные конструкции, характеризующиеся сужением пластины по мере удаления от поперечной плоскости симметрии и наличием дополнительных отверстий, разделяющих между собой крепежные отверстия. Аналогичный результат получен авторами работы [26], исследовавшими фасонки (gusset plates), используемые

при сборке металлоконструкций, с помощью метода эволюционной структурной оптимизации.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика топологической оптимизации пластин для остеосинтеза с применением программы COMSOL Multiphysics.

2. Проведен сравнительный анализ характеристик (продольной жесткости, объема и максимального напряжения, по Мизесу) базовой конструкции пластины и двух оптимизированных вариантов, полученных при различных значениях порога классификации расчетных значений плотности. Установлено, что оптимизированные варианты обеспечивают уменьшение объема пластины на 49–54 %, а продольной жесткости – на 43–53 %, что является положительным эффектом с точки зрения снижения степени экранирования напряжений.

3. Показано, что оптимизированные варианты конструкции пластины сопоставимы с точки зрения продольной жесткости и максимального напряжения, по Мизесу, однако в одном из вариантов возникает прогиб продольных сегментов, величина которого сопоставима со значением продольной деформации, что приводит к повышению полной энергии деформации, являющейся целевой функцией при оптимизации. Для варианта 2 конструкции полная энергия деформации принимает более низкое значение, так как за счет наличия перемычки между продольными сегментами пластины исключается их прогиб.

4. Вариант конструкции с более высокой полной энергией деформации требует дополнитель-

ного исследования, так как сдвиговые напряжения, возникающие в результате контактного взаимодействия продольных сегментов пластины при их прогибе с костью, могут положительно влиять на регенерацию костной ткани.

ЛИТЕРАТУРА

- Global, Regional and National Burden of Bone Fractures in 204 Countries and Territories, 1990–2019: a Systematic Analysis Form the Global Burden of Disease Study 2019 / GBD 2019 Mental Disorders Collaborators // *The Lancet Healthy Longevity*. 2022. Vol. 9, issue 2. P. 137–150. [https://doi.org/10.1016/s2215-0366\(21\)00395-3](https://doi.org/10.1016/s2215-0366(21)00395-3).
- Allgöwer, M. A New Plate for Internal Fixation – the Dynamic Compression Plate (DCP) / M. Allgöwer, S. Perren, P. Matter // *Injury*. 1970. Vol. 2, No 1. P. 40–47. [https://doi.org/10.1016/s0020-1383\(70\)80111-5](https://doi.org/10.1016/s0020-1383(70)80111-5).
- The Limited Contact Dynamic Compression Plate (LC-DCP) / S. M. Perren [et al.] // *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 1990. Vol. 109, No 6. P. 304–310. <https://doi.org/10.1007/bf00636166>.
- Antabak, A. Reducing Damage to the Periosteal Capillary Network Caused by Internal Fixation Plating: an Experimental Study / A. Antabak [et al.] // *Injury*. 2015. Vol. 46, No 6. P. S18–S20. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.10.037>.
- Dai, K. Rational Utilization of the Stress Shielding Effect of Implants / K. Dai // *Biomechanics and Biomaterials in Orthopedics*. London: Springer-Verlag London, 2004. P. 208–215. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3774-0_22.
- Gilbert, J. A. Stress Protection Osteopenia Due to Rigid Plating / J. A. Gilbert // *Clinical Biomechanics*. 1988. Vol. 3, No 3. P. 179–186. [https://doi.org/10.1016/0268-0033\(88\)90065-4](https://doi.org/10.1016/0268-0033(88)90065-4).
- Ahn, A. C. Relevance of Collagen Piezoelectricity to “Wolff’s Law”: a Critical Review / A. C. Ahn, A. J. Grodzinsky // *Medical Engineering & Physics*. 2009. Vol. 31, No 7. P. 733–741.
- Boyle, C. Three-Dimensional Micro-Level Computational Study of Wolff’s Law Via Trabecular Bone Remodeling in the Human Proximal Femur Using Design Space Topology Optimization / C. Boyle, I. Y. Kim // *Journal of Biomechanics*. 2011. Vol. 44, No 5. P. 935–942. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.11.029>.
- Frost, H. M. From Wolff’s law to the Utah Paradigm: Insights About Bone Physiology And its Clinical Applications / H. M. Frost // *The Anatomical Record*. 2001. Vol. 262, iss. 4. P. 398–419. <https://doi.org/10.1002/ar.1049>.
- Palumbo, C. The Osteocyte: From “Prisoner” to “Orchestrator” / C. Palumbo, M. Ferretti // *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*. 2021. Vol. 6, No 1. <https://doi.org/10.3390/jfkm6010028>.
- Sheikh, Z. Biodegradable Materials for Bone Repair and Tissue Engineering Applications / Z. Sheikh [et al.] // *Materials*. 2015. Vol. 8, No 9. P. 5744–5794. <https://doi.org/10.3390/ma8095273>.
- Dichio, G. Engineering and Manufacturing of a Dynamizable Fracture Fixation Device System / G. Dichio [et al.] // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No 19. Article 6844. <https://doi.org/10.3390/app10196844>.
- Samiezadeh, S. On Optimization of a Composite Bone Plate Using the Selective Stress Shielding Approach / S. Samiezadeh [et al.] // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2015. Vol. 42. P. 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.11.015>.
- Kaymaz, I. A New Design for the Humerus Fixation Plate Using a Novel Reliability-Based Topology Optimization Approach to Mitigate the Stress Shielding Effect / I. Kaymaz [et al.] // *Clinical Biomechanics*. 2022. Vol. 99. Article 105768. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2022.105768>.
- Wang, M. Optimal Design and Biomechanical Analysis of a Biomimetic Lightweight Design Plate for distal Tibial Fractures: a Finite Element Analysis / M. Wang [et al.] // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022. Vol. 10. Article 820921. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.820921>.
- Wu, N. The Advances of Topology Optimization Techniques in Orthopedic Implants: a Review / N. Wu [et al.] // *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2021. Vol. 59, No 9. P. 1673–1689. <https://doi.org/10.1007/s11517-021-02361-7>.
- Al-Tamimi, A. A. Novel bone fixation implants minimising stress shielding: PhD thesis / A. A. Al-Tamimi. University of Manchester, 2019. 253 p.
- Gogarty, E. Hierarchical Topology Optimization for Bone Tissue Scaffold: Preliminary Results on the Design of a Fracture Fixation Plate / E. Gogarty, D. Pasini // *Engineering and Applied Sciences Optimization*. – Heidelberg: Springer, 2015. P. 311–340. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18320-6_17.
- Xie, Y. M. Evolutionary Structural Optimization / Y. M. Xie, G.P. Steven. London: Springer-Verlag London, 1997. 188 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0985-3>.
- Bendsøe, M. P. Material Interpolation Schemes in Topology Optimization / M. P. Bendsøe, O. Sigmund // *Archive of Applied Mechanics*. 1999. Vol. 69, No 9–10. P. 635–654. <https://doi.org/10.1007/s004190050248>.
- Zadpoor, A. A. Additively Manufactured Porous Metallic Biomaterials / A. A. Zadpoor // *Journal of Materials Chemistry B*. 2019. Vol. 7, No 26. P. 4081–4226. <https://doi.org/10.1039/c9tb00420c>.
- Díaz, A. Checkerboard Patterns in Layout Optimization / A. Díaz, O. Sigmund // *Structural Optimization*. 1995. Vol. 10, No 1. P. 40–45. <https://doi.org/10.1007/bf01743693>.
- Lazarov, B. S. Maximum Length Scale in Density Based Topology Optimization / B. S. Lazarov, F. Wang // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 318. P. 826–844. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.02.018>.
- Lazarov, B. S. Filters in Topology Optimization Based on Helmholtz-Type Differential Equations / B. S. Lazarov, O. Sigmund // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2011. Vol. 86, No 6. P. 765–781. <https://doi.org/10.1002/nme.3072>.
- Guest, J. K. Elimination Beta-Continuation from Heaviside Projection and Density Filter Algorithms / J. K. Guest, A. Asadpoure, S.-H. Ha // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2011. Vol. 44, No 4. P. 443–453. <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0676-1>.
- Khalaf, A. A. Evolutionary Structural Optimization of Steel Gusset Plates / A. A. Khalaf, M. P. Saka // *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63, No 1. P. 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.03.002>.

Поступила 22.05.2023

Подписана в печать 25.07.2023

Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

- GBD 2019 Mental Disorders Collaborators (2022) Global, Regional and National Burden of Bone Fractures in 204 Countries and Territories, 1990–2019: a Systematic Analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Healthy Longevity*, 9 (1), 137–150. [https://doi.org/10.1016/s2215-0366\(21\)00395-3](https://doi.org/10.1016/s2215-0366(21)00395-3)
- Allgöwer M., Perren S., Matter P. (1970) A New Plate for Internal Fixation – the Dynamic Compression Plate (DCP). *Injury*, 2 (1), 40–47. [https://doi.org/10.1016/s0020-1383\(70\)80111-5](https://doi.org/10.1016/s0020-1383(70)80111-5)
- Perren S. M., Mane K., Pohler O., Predieri M., Steinemann S., Gautier E. (1990) The Limited Contact Dynamic Compression Plate (LC-DCP). *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 109 (6), 304–310. <https://doi.org/10.1007/bf00636166>
- Antabak A., Papes D., Haluzan D., Seiwert S., Fuchs N., Romic I., Davila S., Luetic T. (2015) Reducing Damage to the Periosteal Capillary Network Caused by Internal Fixation Plating: an Experimental Study. *Injury*, 46 (6), S18–S20. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.10.037>
- Dai K. (2004) Rational Utilization of the Stress Shielding Effect of Implants. *Biomechanics and Biomaterials in Orthopedics*. London, Springer-Verlag London, 208–215. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3774-0_22
- Gilbert J. A. (1988) Stress Protection Osteopenia Due to Rigid Plating. *Clinical Biomechanics*, 3 (3), 179–186. [https://doi.org/10.1016/0268-0033\(88\)90065-4](https://doi.org/10.1016/0268-0033(88)90065-4)
- Ahn A. C., Grodzinsky A. J. (2009) Relevance of Collagen Piezoelectricity to “Wolff’s Law”: a Critical Review. *Medical Engineering & Physics*, 31 (7), 733–741. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2009.02.006>
- Boyle C., Kim I. Y. (2011) Three-Dimensional Micro-Level Computational Study of Wolff’s Law Via Trabecular Bone Remodeling in the Human Proximal Femur Using Design Space Topology Optimization. *Journal of Biomechanics*, 44 (5), 935–942. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.11.029>
- Frost H. M. (2001) From Wolff’s Law to the Utah Paradigm: Insights About Bone Physiology and its Clinical Applications. *The Anatomical Record*, 262 (4), 398–419. <https://doi.org/10.1002/ar.1049>
- Palumbo C., Ferretti M. (2021) The Osteocyte: From “Prisoner” to “Orchestrator”. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 6 (1). <https://doi.org/10.3390/jfink6010028>
- Sheikh Z., Najeeb S., Khurshid Z., Verma V., Rashid H., Glogauer M. (2015) Biodegradable Materials for Bone Repair and Tissue Engineering Applications. *Materials*, 8 (9), 5744–5794. <https://doi.org/10.3390/ma8095273>
- Dichio G., Cali M., Terzini M., Putame G., Zanetti E. M., Costa P., Audenino A. L. (2020) Engineering and Manufacturing of a Dynamizable Fracture Fixation Device System. *Applied Sciences*, 10 (19), 6844. <https://doi.org/10.3390/app10196844>
- Samiezadeh S., Avval P. T., Fawaz Z., Bougherara H. (2015) On Optimization of a Composite Bone Plate Using the Selective Stress Shielding Approach. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 42, 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.11.015>
- Kaymaz I., Murat F., Korkmaz İ. H., Yavuz O. (2022) A New Design for the Humerus Fixation Plate Using a Novel Reliability-Based Topology Optimization Approach to Mitigate the Stress Shielding Effect. *Clinical Biomechanics*, 99, 105768. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2022.105768>
- Wang M., Deng Y., Xie P., Tan J., Yang Y., Ouyang H., Zhao D., Huang G., Huang W. (2022) Optimal Design and Biomechanical Analysis of a Biomimetic Lightweight Design Plate for Distal Tibial Fractures: a Finite Element Analysis. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 820921. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.820921>
- Wu N., Li S., Zhang B., Wang C., Chen B., Han Q., Wang J. (2021) The Advances of Topology Optimization Techniques in Orthopedic Implants: a Review. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 59 (9), 1673–1689. <https://doi.org/10.1007/s11517-021-02361-7>
- Al-Tamimi A. A. (2019) *Novel Bone Fixation Implants Minimising Stress Shielding*. PhD Thesis. University of Manchester. 253.
- Gogarty E., Pasini D. (2015) Hierarchical Topology Optimization for Bone Tissue Scaffold: Preliminary Results on the Design of a Fracture Fixation Plate. Lagaros N., Papadarakakis M. (eds). *Engineering and Applied Sciences Optimization*. Heidelberg, Springer, 311–340. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18320-6_17
- Xie Y. M., Steven G. P. (1997) *Evolutionary Structural Optimization*. London, Springer-Verlag London. 188. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0985-3>
- Bendsøe M. P., Sigmund O. (1999) Material Interpolation Schemes in Topology Optimization. *Archive of Applied Mechanics*, 69 (9–10), 635–654. <https://doi.org/10.1007/s004190050248>
- Zadpoor A. A. (2019) Additively Manufactured Porous Metallic Biomaterials. *Journal of Materials Chemistry B*, 7 (26), 4081–4226. <https://doi.org/10.1039/c9tb00420c>
- Diaz A., Sigmund O. (1995) Checkerboard Patterns in Layout Optimization. *Structural Optimization*, 10 (1), 40–45. <https://doi.org/10.1007/bf01743693>
- Lazarov B. S., Wang F. (2017) Maximum Length Scale in Density Based Topology Optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 318, 826–844. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.02.018>
- Lazarov B. S., Sigmund O. (2011) Filters in Topology Optimization Based on Helmholtz-Type Differential Equations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 86 (6), 765–781. <https://doi.org/10.1002/nme.3072>
- Guest J. K., Asadpoure A., Ha S.-H. (2011) Elimination Beta-Continuation from Heaviside Projection and Density Filter algorithms. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 44 (4), 443–453. <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0676-1>
- Khalaf A. A., Saka M. P. (2007) Evolutionary Structural Optimization of Steel Gusset Plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 63 (1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.03.002>

Received: 22.05.2023

Accepted: 25.07.2023

Published online: 29.09.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-387-396>

УДК 53.084

Спектрометр для оценки содержания SO₂ в вулканических выбросах

Канд. физ.-мат. наук И. И. Бручковский^{1,2}, Г. С. Литвинович¹⁾

¹⁾Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Автономный портативный спектрометр DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument) предназначен для полевых измерений наклонных содержаний SO₂ в вулканических выбросах дистанционным оптическим методом DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) в диапазоне 290–365 нм с разрешением не хуже 1 нм. Для его разработки были решены такие задачи, как: практическая реализация спектрометра, включающая в себя разработку оптической схемы; создание корпуса спектрометра, обеспечивающего функции уменьшения рассеянного излучения и удобство юстировки; использование набора дополнительных датчиков для регистрации условий измерений; проведение серии лабораторных измерений для определения характеристик спектрометра; проведение серии натурных измерений и предварительная обработка полученных данных с целью восстановления наклонных толщ диоксида серы в вулканическом выбросе. На этапе разработки спектрометра использовались методы численного моделирования оптических систем в программной среде Zemax, на этапе обработки экспериментальных данных для восстановления наклонных содержаний диоксида серы – метод DOAS. Представлены результаты лабораторных измерений характеристик спектрометра: спектральное разрешение $0,58 \pm 0,5$ нм, угловое поле зрения $1 \times 0,25^\circ$. Экспериментально определенные параметры шума детектора DEVI применялись для построения математического фильтра с целью увеличения отношения сигнал – шум, что позволило оценить содержание диоксида серы в вулканических выбросах. DEVI успешно опробован в ходе экспедиций на Курильские острова в периоды 31.07–13.08.2021 и 27.07–29.08.2022, в результате чего восстановлена величина наклонного содержания $(7,5 \pm 1,2) \cdot 10^{17}$ молекул/см² в выбросе вулкана Чиринкотан. Полученная оценка наклонного содержания диоксида серы согласуется с результатами, полученными различными научными группами с использованием аналогичного метода для других вулканов.

Ключевые слова: DOAS, УФ-спектрометр для полевых измерений, вулканические выбросы, диоксид серы

Для цитирования: Бручковский, И. И. Спектрометр для оценки содержания SO₂ в вулканических выбросах / И. И. Бручковский, Г. С. Литвинович // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 387–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-387-396>

Spectrometer for Estimating SO₂ Content in Volcanic Plumes

I. I. Bruchkouski^{1,2}, H. S. Litvinovich¹⁾

¹⁾A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾National Research Center for Ozonosphere Monitoring of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This work presents the development and implementation of an autonomous portable spectrometer DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument), designed to measure SO₂ slant columns in volcanic plumes by remote optical method DOAS (Differential

Адрес для переписки

Литвинович Глеб Святославович
Институт прикладных физических проблем
имени А. Н. Севченко БГУ
ул. Академика Курчатова, 7,
220045, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: 375 29 391-07-10
litvinovichgs@yandex.by

Address for correspondence

Litvinovich Hleb S.
A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical
Problems of Belarusian State University
7, Academician Kurchatov str.,
220045, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: 375 29 391-07-10
litvinovichgs@yandex.by

Optical Absorption Spectroscopy) in the range of 290–365 nm with a resolution of at least 1 nm. To achieve this goal, the following tasks have been solved: practical implementation of the spectrometer, including design of optical scheme; design of a spectrometer housing for reducing scattered radiation and facilitate adjustments; applying of additional sensors to record measurement conditions; laboratory measurements to determine the spectrometer's characteristics; field measurements and preliminary data processing to retrieve SO₂ slant columns in volcanic plumes. During the spectrometer design phase, numerical simulation methods in the Zemax software have been used, while DOAS was applied for processing experimental data for retrieving SO₂ slant columns. Our laboratory measurements showed that the DEVI spectrometer has a spectral resolution of 0.58 ± 0.5 nm and an angular field of view of $1 \times 0.25^\circ$. To improve the signal-to-noise ratio, mathematical filter based on the experimentally determined noise parameters of the DEVI detector has been introduced, which allowed us to estimate the SO₂ slant columns in volcanic plumes. DEVI was successfully tested during expeditions to the Kuril Islands in the periods of July – August, 2021 and 2022 (31.07–13.08.2021 and 27.07–29.08.2022). Our field measurements and data processing showed the SO₂ slant column value of $(7.5 \pm 1.2) \cdot 10^{17}$ molecules/cm² for the volcano Chirinkotan. Obtained estimation is consistent with known results obtained for other volcanoes.

Keywords: DOAS, UV-spectrometer for field measurements, volcanic plumes, sulfur dioxide

For citation: Bruchkouski I. I., Litvinovich H. S. (2023) Spectrometer for Estimating SO₂ Content in Volcanic Plumes. *Science and Technique*. 22 (5), 387–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-387-396> (in Russian)

Введение

Один из способов предсказания извержений вулканов – анализ измерений газового состава вулканических выбросов [1–3]. В зависимости от геологических особенностей породы и близости магмы к поверхности Земли соотношение концентраций вулканических газов в выбросах (SO₂, BrO и др.) может изменяться. Например, увеличение содержания SO₂ в выбросах свидетельствует о близости магмы к поверхности.

Основной проблемой проведения измерений газового состава вулканических выбросов является относительно высокий риск здоровью исследователя, обусловленный в том числе высоким содержанием загрязнений воздуха вблизи объекта исследований. В этой связи актуальность представляют инструменты, позволяющие проведение измерений газового состава вулканических выбросов дистанционным методом.

В мировой практике для изучения газового состава вулканических выбросов дистанционными оптическими методами, наряду с методами Фурье-спектроскопии и корреляционной спектроскопии, применяют метод DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) [4] в диапазоне 305–365 нм, где находятся линии поглощения SO₂, BrO и ClO. Наблюдения по методу DOAS производятся с помощью как стационарных пунктов долговременного наблюдения, которые позволяют получать длительные временные ряды наклонных содержаний вулканических газов [5], так и переносных

малогабаритных приборов [6], построенных на базе миниатюрных спектрометров, производимых в промышленном масштабе различными фирмами, или мелкими сериями как проекты отдельных университетов. В последнем случае приходится находить компромисс между весом прибора, его автономностью и качеством получаемых данных. В этой связи актуальность представляет оптимизация конструкции прибора, в том числе оптической схемы спектрометра, таким образом, чтобы одновременно обеспечить приемлемое качество регистрируемых данных в УФ-диапазоне и высокую автономность в условиях экспедиции.

Цель настоящей работы – разработка и реализация автономного портативного спектрометра DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument), оптимизированного для регистрации спектров рассеянного солнечного излучения небесной сферы в диапазоне 290–365 нм со спектральным разрешением не хуже 1 нм, позволяющего проведение дистанционных измерений содержания диоксида серы в вулканических выбросах и его опробование в условиях экспедиции. Содержание диоксида серы в вулканическом выбросе определялось методом дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (DOAS).

Отличия DEVI от аналогов заключаются в оптической схеме собственной разработки, содержащей минимальное число компонентов, что в некоторой степени минимизирует уровень рассеянного света, и наличии комплекта дополнительных датчиков, предназначенных для регистрации условий измерений с целью по-

следующего облегчения интерпретации и обработки первичных данных. Разработанный спектрометр был опробован в экспедициях на Курильские острова в 2021 и 2022 гг., по результатам которых в настоящей работе оценивается успешность предлагаемой конструкции.

Описание спектрометра DEVI

DEVI представляет собой цельный неделимый блок, в составе которого находятся все необходимые для работы модули, включая источник питания. Главный оптический модуль DEVI – это спектрометр собственной разработки, спроектированный для вогнутой отражающей дифракционной решетки (радиус кривизны $R = 60$ мм, диаметр 20 мм, плотность штрихов 2581 штр./мм) и неохлаждаемой ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG [7], имеющей 3648 рабочих и 13 конструктивно изолированных от света пикселей. Оптическая схема спектрометра представлена на рис. 1.

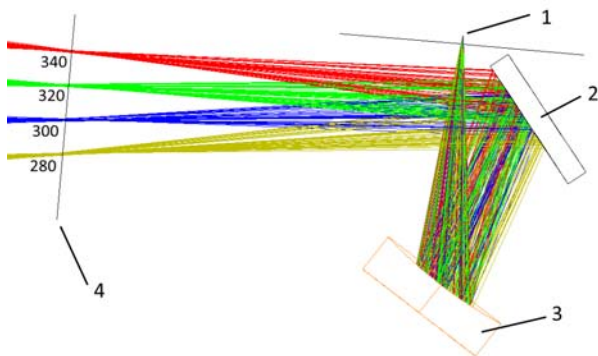


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра DEVI: 1 – входная щель; 2 – плоское зеркало; 3 – вогнутая дифракционная решетка; 4 – детектор с указанием соответствующих длин волн падающего излучения

Fig. 1. Optical layout of DEVI spectrometer: 1 – entrance slit; 2 – flat mirror; 3 – concave diffraction grating; 4 – detector with corresponding wavelengths of the incident radiation

Спектрометр имеет систему освещения входной щели (объектив), которая обеспечивает поле зрения около $1 \times 0,25^\circ$ (вдоль и поперек входной щели спектрометра; на рис. 1 не показана). Оптическая схема спектрометра рассчитывалась в программной среде Zemax [8] в непоследовательном режиме, оптимизация параметров оптической схемы производилась по максимуму плотности излучения на модели

детектора для следующих длин волн: 280, 300, 320 и 340 нм для входной щели размером 3000×50 мкм. Входная щель спектрометра собиралась вручную из двух заточенных металлических пластин, параллельность которых контролировалась визуально под микроскопом. Расчетная величина ширины аппаратной функции на полувысоте для диапазона 290–365 нм составила 0,61–0,65 нм.

Юстировка спектрометра включала в себя два этапа. Сперва производилась минимизация полуширины аппаратной функции спектрометра при помощи незначительного изменения положения решетки, зеркала и детектора при регистрации монохроматических линий ртутной газоразрядной лампы низкого давления, помещенной в фотометрическую сферу. Далее следовал этап уменьшения сферических aberrаций, комы и астигматизма при помощи специально разработанных блендов, положение и форма которых определялись экспериментально за несколько итераций.

На рис. 2 представлены внешний вид корпуса спектрометра на различных этапах его разработки, начиная от трехмерной модели и заканчивая готовым изделием. Корпус спектрометра спроектирован таким образом, чтобы тонкую подстройку положения зеркала и решетки (рис. 2а) можно было осуществлять, не открывая защитной крышки, поскольку доступ ко всем юстировочным элементам (винтам) имеется извне, что, в свою очередь, позволяет проводить настройку спектрометра в режиме реального времени при закрытом корпусе. Расположение световых ловушек (рис. 2а) выбрано таким образом, чтобы минимизировать рассеянный свет от нулевого порядка дифракции, а их острая форма исключает появление бликов. Объектив содержит двояковыпуклую линзу (рис. 2б) с фокусным расстоянием 90 мм из стекла марки КУ-1, а также синий фильтр, отсекающий видимый и ИК диапазоны для уменьшения уровней рассеянного света внутри спектрометра.

На рис. 3а представлен внешний вид DEVI со снятой крышкой, где обозначены видимые элементы. В управляющей программе реализованы два режима работы (ручной и автоматический для работы на штативе), для которых предусмотрены различные режимы выбора

времени экспозиции (ручной и автоматический). Переключение режимов производится при помощи кнопок 4 (рисунок 3b) на лицевой панели для возможности выбора различных режимов съемки (одиночный спектр, непрерывная съемка, темновой и опорный спектры)

и кнопкой перезагрузки управляющего микроконтроллера 5. Для возможности ручного выбора времени экспозиции сбоку корпуса предусмотрен инкрементный энкодер 7, позволяющий вручную выбирать время экспозиции с шагом в 0,1 мс.

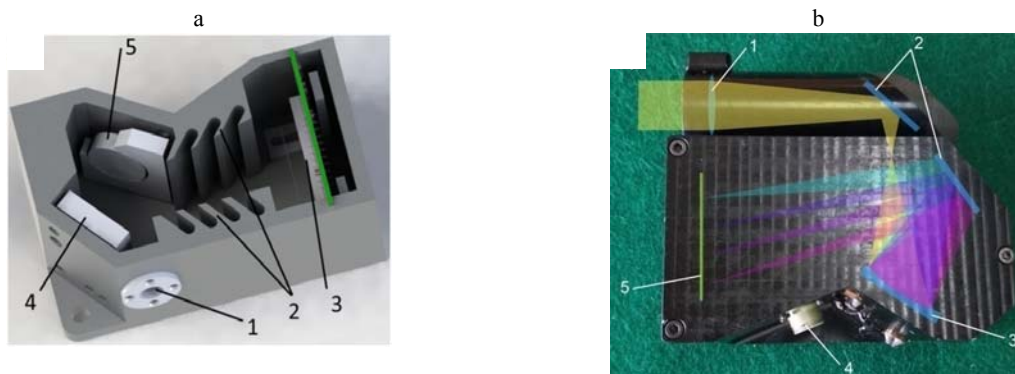


Рис. 2. Корпус спектрометра и схематичный ход лучей: а – 3D модель без объектива, юстировочных винтов и светового замка (1 – узел входной щели; 2 – световые ловушки; 3 – детектор; 4 – плоское зеркало; 5 – дифракционная решетка); б – готовый спектрометр и ход световых лучей в нем (1 – объектив; 2 – плоские зеркала; 3 – дифракционная решетка; 4 – разъем сигнала с детектора; 5 – детектор)

Fig. 2. Spectrometer unit and ray layout: а – 3D model without lens, adjusting screws and light lock (1 – entrance slit assembly; 2 – light traps; 3 – detector; 4 – flat mirror; 5 – diffraction grating); б – assembled spectrometer and path of light in it (1 – lens; 2 – flat mirrors; 3 – diffraction grating; 4 – signal connector from detector; 5 – detector)

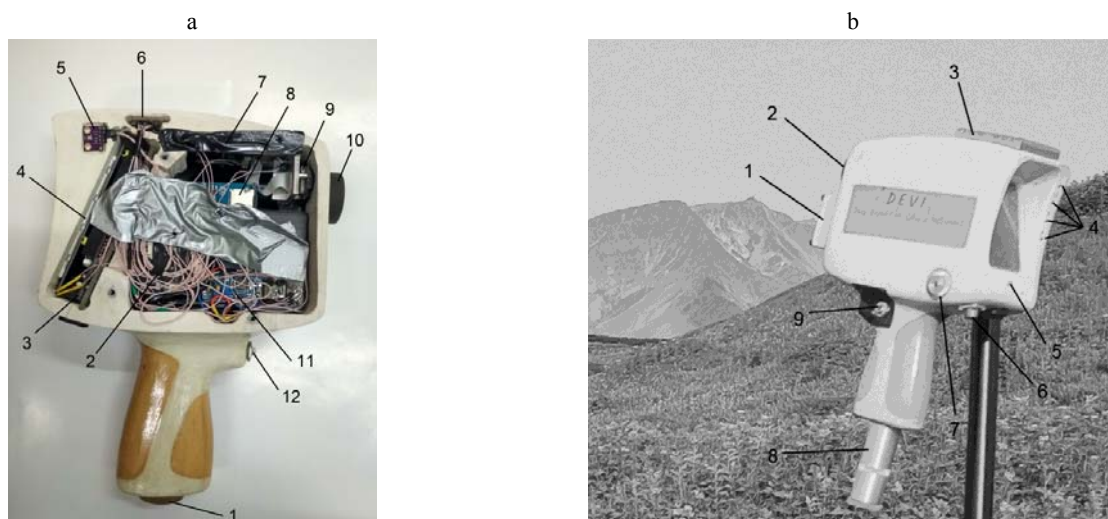


Рис. 3. Внешний вид DEVI: а – до первой экспедиции, со снятой крышкой (1 – крышка отсека элемента питания; 2 – плата АЦП детектора спектрометра; 3 – плата контроллера; 4 – экран; 5 – датчик BME280; 6 – GPS датчик; 7 – плата видеорежистратора; 8 – карта памяти; 9 – видеокамера; 10 – объектив спектрометра; 11 – DC-DC преобразователь; 12 – кнопка запуска регистрации); б – во время второй экспедиции, на штативе (1 – фотокамера; 2 – объектив спектрометра; 3 – радиатор; 4 – кнопки выбора режимов работы; 5 – кнопка перезагрузки; 6 – разъем для подключения внешнего питания; 7 – энкодер; 8 – дополнительный отсек с батареями; 9 – кнопка включения)

Fig. 3. Outer design of DEVI: а – before the first expedition, without cover (1 – cover of battery compartment; 2 – ADC board of detector; 3 – controller board; 4 – screen; 5 – BME280 sensor; 6 – GPS sensor; 7 – video recorder board; 8 – memory card; 9 – video camera; 10 – spectrometer lens; 11 – DC-DC converter; 12 – button for launching registration); б – during the second expedition, in operating mode (1 – camera; 2 – spectrometer lens; 3 – radiator; 4 – buttons for selecting operating modes; 5 – reset button; 6 – connector for external power supply; 7 – encoder; 8 – additional compartment with battery; 9 – power button)

В DEVI интегрирован видеорегистратор для записи исследуемого объекта во время измерений. Одновременно с видеорегистрацией фотопривязка объекта к спектру осуществляется дополнительной фотокамерой 1 (рис. 3b, модель OV7670, 640×480 пикселей со встроенным буфером памяти). Фиксирование фотокамеры выполнено при помощи крепления «ласточкин хвост» к корпусу спектрометра, что обеспечивает одинаковую многократную установку и, в свою очередь, жесткую привязку полей зрения спектрометра и видеокамеры. Кадр с фотокамеры передается на микроконтроллер для последующего отображения на экране DEVI и сохранения на карту памяти. Данные, получаемые при помощи видеорегистратора, сохраняются независимо.

Для регистрации условий проведения измерений используются следующие периферийные устройства: GPS-приемник HT1818Z3G5L, компас и инклинометр MPU9250, а также датчик метеопараметров BME280.

В качестве управляющего контроллера использовалась плата Arduino Due, для управления и считывания сигнала с детектора применялась плата собственной разработки на основе микроконтроллера STM32F103. Для оцифровки предварительно масштабированного операционным усилителем AD8021 сигнала с детектора применялся встроенный в микроконтроллер 12-битный АЦП. Тактовая частота микроконтроллера (72 МГц) позволила реализовать диапазон времен накопления сигнала от 10 мкс до 30 мин. Частота оцифровки пикселей детектора составила 250 кГц.

Имеющийся TFT экран на базе ILI9486 предназначен для отображения регистрируемого спектра и вывода информации, получаемой с датчиков: времени, координаты, значений температуры, относительной влажности и атмосферного давления, угла наклона прибора, азимута, индикатора заряда батареи, времени экспозиции, а также фотоизображения с камеры OV7670.

На рис. 4 представлена блок-схема DEVI. Программа управления микроконтроллером STM32F103 детектора написана на языке C с максимальным использованием аппаратных средств микроконтроллера (таймеры, ШИМ, DMA, интерфейс SPI), оставляя вычислительные возможности контроллера свободными для дополнительных задач. Управление детектором TCD1304DG полностью реализовано (в соответствии с документацией [7]) за счет встроенных в микроконтроллер таймеров: один отвечает за тактирование детектора, второй – за время накопления сигнала, третий – за считывание. Все таймеры синхронизированы между собой для исключения задержек и сбоев в работе детектора.

Программа управления Arduino Due написана на языке C с использованием стандартных библиотек Arduino IDE. Ее функции сводятся к поочередному опросу датчиков (каждого со своей частотой) и камеры 1 (рис. 3b), обновлению информации на экране. Кроме того, программа обрабатывает события нажатий на кнопки (рис. 3a), считывает сигнал с детектора и сохраняет его на встроенную карту памяти вместе с метаданными, осуществляет смену режимов работы прибора и изменение времени накопления сигнала детектора.

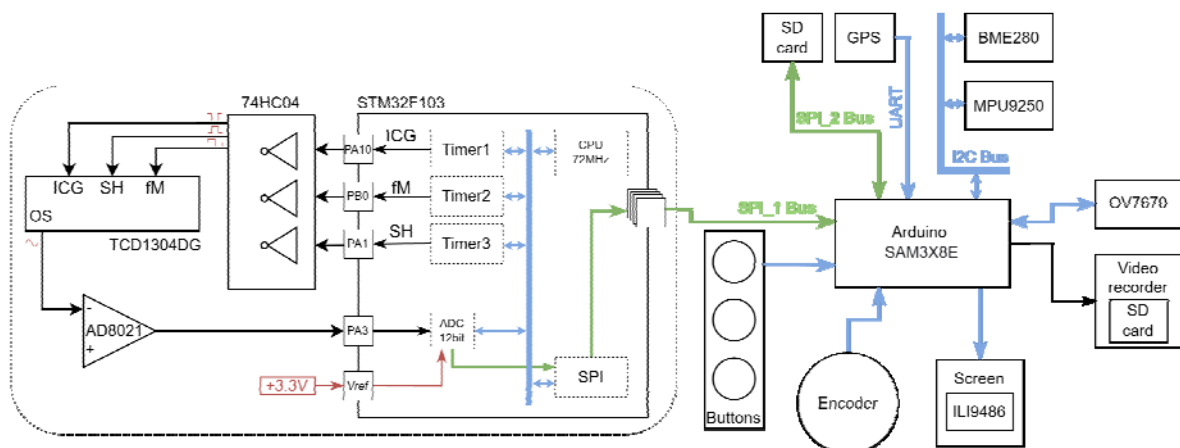


Рис. 4. Схематическое описание архитектуры DEVI:

синий – интерфейсы передачи данных, зеленый – путь передачи оцифрованного сигнала детектора

Fig. 4. Schematic description of DEVI architecture:

blue – data transfer interfaces, green – route of digital signal from detector

Литиевая батарея размещается в рукояти корпуса и обеспечивает непрерывную работу прибора около трех часов. Форма и конструкция защитного корпуса DEVI разрабатывались таким образом, чтобы регистрацию спектров яркости небесной сферы можно было производить одной рукой. Корпус DEVI имеет кронштейн для крепления к штативу, что также позволяет проводить серию измерений при неизменном направлении визирования в автоматическом режиме.

Лабораторные исследования параметров DEVI

Угловые поля зрения спектрометра, видеорегистратора и видеокамеры, а также их относительное расположение в пространстве определялись при помощи специально разработанной гониометрической установки для угловых калибровок. Установка представляет собой две поворотные платформы, вращающиеся во взаимно перпендикулярных плоскостях (горизонтальной и азимутальной), и позволяет проведение привязки полей зрения оптических систем в двух плоскостях за одну установку с точностью порядка 70 угловых секунд.

Эффективный рабочий диапазон спектрометра (область спектра, в которой выполняется DOAS-анализ) находится в диапазоне 304–364 нм, для которого экспериментально определенное спектральное разрешение (ширина монохроматической линии в нанометрах на половине высоты) составило $0,58 \pm 0,5$ нм, время регистрации спектра интенсивностью 2/3 от уровня насыщения детектора составило 3 с (условия регистрации: дневное время, участок безоблачного неба).

На рис. 5а представлен вид аппаратной функции спектрометра при регистрации ртутной линии от протяженного источника, что

подтверждает правильность выполнения всех юстировок и эффективность выбора блендов, так как спектральное разрешение на длине волны 334,14 нм составило 0,61 нм.

Таким образом, применение корректирующих блендов позволило немного уменьшить aberrации в схеме, за счет чего спектральное разрешение для отдельных длин волн удалось улучшить на 13 % в сравнении с минимальным теоретически рассчитанным значением, при этом интенсивность линий уменьшилась не более чем на 10 % от исходной величины. Вместе с тем из данных рис. 5а можно заметить некоторую несимметричность линии в ее правой части, которая обусловлена оставшимися aberrациями.

Для определения оптимальных режимов работы прибора проводился специальный эксперимент в соответствии с методикой, изложенной в [9], а именно, регистрировался сигнал с детектора при отсутствии излучения на различных временах накопления сигнала. Полученный массив данных позволил экспериментально определить среднеквадратические отклонения (СКО) структурного шума и шума считывания используемого детектора в зависимости от времени накопления, которые представлены на рис. 5б. Из рисунка можно заметить, что явной зависимости СКО компонент шума от времени накопления не наблюдается, полезный сигнал для любого времени накопления имеет амплитуду шума в пределах 2–3 ед. АЦП, а шум считывания в два-три раза превосходит структурный шум для любого времени накопления.

Другими словами, лабораторные исследования параметров компонент шума детектора показали, что влиянием времени накопления на параметры фильтра в предварительной математической обработке отдельного спектра можно пренебречь.

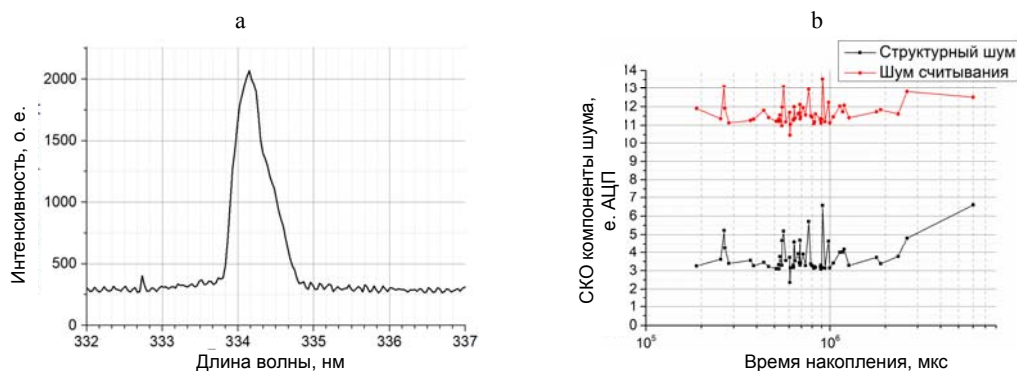


Рис. 5. Аппаратная функция спектрометра DEVI (а) и зависимость компонент шума детектора для различных времен накопления (б)

Fig. 5. DEVI spectrometer's slit function (a) and dependency of detector noise components for various accumulation times (b)

Наличие повторяющейся структуры в различных компонентах шума может быть связано с некоторой дополнительной компонентой, не выделенной в ходе исследования и вызванной, например, особенностями аппаратной реализации электронной обвязки детектора.

Методика измерений и обработки спектральных данных

Методика измерений подразумевала получение данных различного типа:

1) опорные спектры – регистрировались в зенитном направлении или направлении, не содержащем вулканических шлейфов. Регистрация спектров производилась с рук несколькими сериями по 20 спектров в каждой, с минимальной задержкой перед регистрацией полезных спектров. Таким образом, опорные спектры априорно не содержат в себе информацию о газовом составе вулканического выброса, однако содержат информацию об атмосферных малых газовых составляющих, рассеянии Рэлея и Ми, а также о фраунгоферовских линиях;

2) полезные спектры – регистрировались в направлении на шлейф вулканического выброса, в различных местах шлейфа. Поле зрения спектрометра ориентировалось при помощи видеокамеры, после чего производилась регистрация нескольких спектров в различных местах шлейфа. Полезные спектры содержат в себе всю ту информацию, что и опорные спектры, а также информацию о неупругом поглощении рассеянного солнечного излучения газами вулканического выброса;

3) темновые спектры – регистрировались при отсутствии оптического сигнала при закрытой крышке объектива спектрометра для тех времен экспозиции, на которых регистрировались опорные и темновые спектры.

Таким образом, совокупность перечисленных выше данных образует серию измерений и позволяет применить метод DOAS для анализа полезных спектров.

В основе метода DOAS лежит уравнение Бугера – Ламберта – Бэра, записанное для пространства излучения в атмосфере в следующем виде:

$$I_0(\lambda, L) = I_0(\lambda) \exp \times \left[- \int_0^L \left(\sum_j \sigma_{j0}(\lambda) c_j(l) + \varepsilon_R(\lambda, l) + \varepsilon_M(\lambda, l) \right) dl \right], \quad (1)$$

где $I_0(\lambda, L)$ – спектр после прохождения излучением пути длиной L ; $I_0(\lambda)$ – то же в отсутствие

поглотителей; $\sigma_{j0}(\lambda)$ – сечения поглощения; c_j – концентрация j -й микропримеси; $\varepsilon_R(\lambda, L)$, $\varepsilon_M(\lambda, L)$ – коэффициенты поглощения для рассеяния Рэлея и Ми соответственно.

Измеряемая величина в таком случае – наклонное содержание SCD_j – является интегральной концентрацией j -й газовой микропримеси вдоль неизвестного пути света L

$$SCD_j(L) = \int_0^L c_j(l) dl \text{ [молекул/см}^2\text{]}. \quad (2)$$

Кроме описанных в формуле (1) трех основных процессов ослабления излучения в атмосфере, есть еще один процесс второго порядка малости, пренебрежение которым накладывает ограничение на точность метода, а именно ринг-эффект. Ринг-эффект учитывают введением в процедуру DOAS-анализа фиктивного сечения поглощения $\sigma_{\text{Ring}}(\lambda)$, который рассчитывается методами квантовой механики.

Процедура DOAS-анализа представляет собой минимизацию целевой функции χ^2 масштабированных сечений поглощения одновременно нескольких малых газовых составляющих, коэффициентов полинома, сечения ринг-эффекта и измеренного спектра поглощения, который получается путем удаления фраунгоферовых линий. Для минимизации функции χ^2 обычно применяется нелинейный метод Левенберга – Маркварда в подходящем диапазоне длин волн

$$\chi^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\ln I(\lambda, L) - \ln I_0(\lambda) + \sum_j \sigma_j(\lambda) DSCD_j(L) + \sum_m p_m \lambda^m \right] d\lambda \rightarrow \min. \quad (3)$$

Последнее слагаемое (3) учитывает медленно меняющуюся часть для рассеяний Рэлея и Ми, а также для других атмосферных примесей с широкой полосой поглощения, p_m – коэффициенты полинома степени m . Диапазон длин волн выбирается так, чтобы в нем содержались спектральные особенности сечений поглощений целевых малых газовых составляющих.

Для минимизации влияния колебаний температуры на стабильность оптических параметров спектрометра и постоянство шумовых характеристик детектора период проведения серии измерений сокращался до 2–5 мин.

Обработка натуральных спектров производилась методом DOAS при помощи программного обеспечения QDOAS v.2.111 [10], в проце-

дуре анализа учитывались сечения поглощения, представленные в табл. 1. Восстановление наклонных содержаний SO_2 проводилось с использованием полинома порядка 2 для интервала 307,5–316 нм. Кроме того, для коррекции уровня рассеянного света применялась настройка *offset* второго порядка.

Таблица 1
Сечения поглощения и настройки,
использованные для восстановления SO_2
Absorption cross sections and settings
used for SO_2 retrieval

Сечение поглощения	Примечание	Интервал анализа, нм
SO ₂	SO ₂ _vandaele_293	307,5–316
O ₃	O ₃ _243K_Bogumil (I ₀ -коррекция 1·10 ²⁰ мол/см ²)	
BrO	BrO_Wilmouth_298K	
Ring	Ring_NDSC2003	
Ring·λ ⁴		

Для коррекции собственного шума детектора использовался фильтр [11], так как такой подход позволяет рассчитать параметры последнего на основании экспериментально измеренных статистических параметров шума конкретного детектора с учетом схемотехнических особенностей сопряженного с ним модуля считывания. Значение интенсивности b'_i i -го оцифрованного пикселя в спектре пересчитывалось по формуле

$$b'_i = \mu_{i-4,i+4} + \frac{\sigma_{i-4,i+4}^2 - v^2}{\sigma_{i-4,i+4}^2} \times$$

$$\times (b_i - \mu_{i-4,i+4}) = \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k} +$$

$$+ \frac{\left(\frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 \left[b_{i-k}^2 - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k} \right] \right)^2 - v^2}{\left(\frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 \left[b_{i-k}^2 - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k} \right] \right)^2} \times$$

$$\times \left(b_i - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k} \right), \quad (4)$$

где b_i – значение интенсивности i -го пикселя зашумленного спектра; μ – математическое среднее значений b_i в окне из девяти пикселей, которого достаточно для оценки локальных параметров спектра, но не оказывает влияния на уширение спектральных линий; σ – СКО

значений b_i в окне; v – СКО значений шума в спектре.

В качестве набора темновых сигналов для определения параметров компонент шума v детектора использовали массив темновых спектров, зарегистрированный при тех же температурах и временах экспозиции, при которых регистрировались серии измерений во время экспедиции.

Первые результаты

Впервые прибор был опробован в ходе экспедиций на Курильские острова в период 31.07–13.08.2021 (вулканы Чиринкотан, Синарка, Берга, Кунтаминар) и 27.07–29.08.2022 (вулканы Чикурачки, Эбеко). Результат наложения всех областей регистрации DEVI представлен на рис. 6а. На рис. 6б показаны примеры спектров, зарегистрированных в направлении вулканического выброса (полезные спектры) и в зенитном направлении (опорный спектр).

В ходе первой экспедиции для исследования динамики газовых выбросов в конкретной точке вулканического шлейфа регистрация полезных спектров производилась с использованием штатива в автоматическом режиме (влк. Чиринкотан). В ходе второй экспедиции с целью отслеживания происходящих вдоль направления распространения шлейфа химических реакций в процессе распространения и остывания вулканического выброса, производилась регистрация полезных спектров под различными углами линии наблюдения с использованием штатива (влк. Чикурачки).

На рис. 7 представлен вид вулканического выброса вулкана на о. Чиринкотан за два дня до его извержения, направление визирования спектрометра и пример восстановления наклонного содержания (SCD) SO_2 в спектральном интервале 307,5–316 нм.

Стоит отметить, что представленный на рис. 7б пример DOAS-анализа для SO_2 демонстрирует полученную величину наклонного содержания $(7,5 \pm 1,2) \cdot 10^{17}$ молекул/см², которая хорошо согласуется с известными данными [4, 12].

Кроме того, из рис. 7б можно заметить, что измеренные значения сечения поглощения SO_2 показывают наличие значимых искажений, остаточный спектр имеет довольно большую амплитуду и отличается присутствием заметной структуры. Эти особенности в совокупности указывают на потенциал для улучшения системы регистрации полезного сигнала спектрометра.

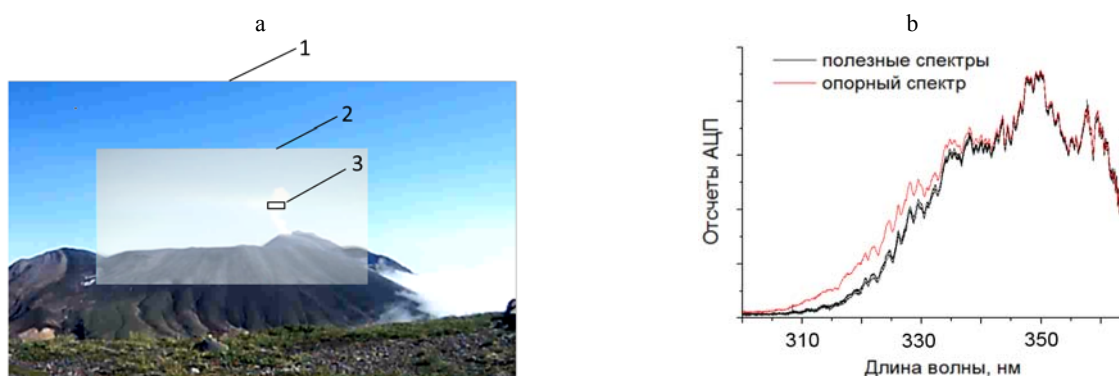


Рис. 6. Видеопривязка объекта и поля зрения спектрометра и пример получаемого спектра:
а – области регистрации DEVI (1 – кадр видеорегистратора; 2 – кадр фотокамеры; 3 – поле зрения спектрометра);
б – пример регистрируемых спектров

Fig. 6. Registration area of object and field of view of spectrometer and an example of recorded spectrum:
а – DEVI registration areas (1 – video recorder frame; 2 – camera frame; 3 – spectrometer's field of view);
б – example of recorded spectra



Рис. 7. Вулканический шлейф выброса на о. Чиринкотан за два дня до извержения (а)
и пример восстановления наклонных содержаний SO_2 (б)

Fig. 7. Volcanic plume emissions on Chirinkotan Island two days before eruption (a)
and example of retrieval of SO_2 slant columns (b)

ВЫВОДЫ

1. Разработан одномодульный автономный портативный спектрометр DEVI (масса 1,4 кг), содержащий миниатюрный спектрометр собственного дизайна на диапазон 290–365 нм с разрешением $0,58 \pm 0,5$ нм, позволяющий регистрацию сигнала за время экспозиции не более 3 с.

2. Примененная методика юстировки спектрометра с использованием итерационно регулируемых блендов позволила практически реализовать спектральное разрешение $0,58 \pm 0,5$ нм, в то время как теоретически рассчитанное разрешение составило 0,61–0,65 нм. Таким образом, на отдельных длинах волн удалось получить спектральное разрешение на 13 % лучше, чем рассчитанное теоретически. При этом стоит отметить, что в модели была выбрана мини-

мальная величина входной щели спектрометра, так что дальнейшее ее сужение приводило лишь к уменьшению интенсивности линий.

3. Разработанный спектрометр снабжен различными периферийными устройствами (видеокамера, видеорегистратор, GPS-приемник, датчик температуры, давления и относительной влажности, инклинометр), которые значительно упрощают интерпретацию полученных данных. Проведенный предварительно комплекс лабораторных угловых калибровок вместе с использованием встроенного TFT-экрана позволил в условиях экспедиции в режиме реального времени ориентировать поле зрения спектрометра в различные области вулканического выброса, что, в свою очередь, позволило исключить измерения спектров яркости из оптически плот-

ных участков шлейфа, корректировать направление визирования в зависимости от направления ветра, а также проводить измерения в различных точках шлейфа. Характеристики чувствительности детектора и шумовые характеристики разработанной электронной обвязки в совокупности показали практическую возможность успешного применения метода DOAS к зарегистрированным спектрам с целью восстановления содержания диоксида серы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sparks, R. S. J. Forecasting Volcanic Eruptions / R. S. J. Sparks // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 210, No 1. P. 1–15. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00124-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00124-9).
2. Forecasting, Detecting, and Tracking Volcanic Eruptions from Space / M. P. Poland [et al.] // *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*. 2020. Vol. 3, iss. 1. P. 55–94. <https://doi.org/10.1007/s41976-020-00034-x>.
3. Forecasting Etna Eruptions by Real-Time Observation of Volcanic Gas Composition / A. Aiuppa [et al.] // *Geology*. 2007. Vol. 35, No 12. P. 1115–1118. <https://doi.org/10.1130/g24149a.1>.
4. Platt, U. *Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications* / U. Platt, J. Stutz. Berlin: Springer-Verlag, Heidelberg, 2008. 597 p.
5. Variation of the BrO/SO₂ Molar Ratio in the Plume of Tungurahua Volcano Between 2007 and 2017 and Its Relationship to Volcanic Activity / S. Warnach [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7. P. 1–14. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00132>.
6. Detection of Bromine Monoxide in a Volcanic Plume / N. Bobrowski [et al.] // *Nature*. 2003. Vol. 423, iss. 6937. P. 273–276. <https://doi.org/10.1038/nature01625>.
7. Toshiba TCD1304DG [Electronic Resource]. Mode of access: <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1304DG.html> – Date of access: 23.07.2020.
8. Zemax Official Website [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.zemax.com/>. Date of access: 21.08.2022.
9. A Technique for Evaluation of CCD Video-Camera Noise / K. Irie [et al.] // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2008. Vol. 18, Iss. 2. P. 280–284. <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2007.913972>.
10. QDOAS software [Electronic Resource]. Mode of access: <https://uv-vis.aeronomie.be/software/QDOAS/>. Date of access: 04.04.2023.
11. Литвинович, Г. С. Алгоритм предварительной обработки данных линейки приборов с зарядовой связью на основе адаптивного фильтра Винера / Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский // *Информатика*. 2021. Т. 18, No 1. С. 72–83. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83>.
12. BrO/SO₂ Molar Ratios From Scanning DOAS Measurements in the NOVAC Network / P. Lübcke [et al.] // *Solid Earth*. 2014. Vol. 5, iss. 1. P. 409–424. <https://doi.org/10.5194/se-5-409-2014>.

Поступила 18.04.2023

Подписана в печать 20.06.2023

Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Sparks R. S. J. (2003) Forecasting Volcanic Eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 210 (1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00124-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00124-9).
2. Poland M. P., Lopez T., Wright R., Pavolonis M. J. (2020) Forecasting, Detecting, and Tracking Volcanic Eruptions from Space. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 3 (1), 55–94. <https://doi.org/10.1007/s41976-020-00034-x>.
3. Aiuppa A., Moretti R., Federico C., Giudice G., Gurrieri S., Liuzzo M., Papale P., Shinohara H., Valenza M. (2007) Forecasting Etna Eruptions by Real-Time Observation of Volcanic Gas Composition. *Geology*, 35 (12), 1115–1118. <https://doi.org/10.1130/g24149a.1>.
4. Platt U., Stutz J. (2008) *Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications*. Berlin, Springer-Verlag, Heidelberg, 2008. 597.
5. Warnach S., Bobrowski N., Hidalgo S., Arellano S., Sihler H., Dinger F., Lübcke P., Battaglia J., Steele A., Galle B., Platt U., Wagner T. (2019) Variation of the BrO/SO₂ Molar Ratio in the Plume of Tungurahua Volcano Between 2007 and 2017 and Its Relationship to Volcanic Activity. *Frontiers in Earth Science*, 7, 1–14. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00132>.
6. Bobrowski N., Hönninger G., Galle B., Platt U. (2003) Detection of Bromine Monoxide in a Volcanic Plume. *Nature*, 423 (6937), 273–276. <https://doi.org/10.1038/nature01625>.
7. Toshiba TCD1304DG. Available at: <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1304DG.html> (accessed 23 July 2020).
8. Zemax Official Website. Available at: <https://www.zemax.com> (accessed 21 August 2022).
9. Irie K., McKinnon A. E., Unsworth K., Woodhead I. M. (2008) A Technique for Evaluation of CCD Video-Camera Noise. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 18 (2), 280–284. <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2007.913972>.
10. QDOAS Software. Available at: <https://uv-vis.aeronomie.be/software/QDOAS/> (accessed 04 April 2023).
11. Litvinovich H. S., Bruchkouski I. I. (2021) Algorithm for Preliminary Processing of Charge Coupled Devices Array Data Based on the Adaptive Wiener filter. *Informatika = Informatics*, 18 (1), 72–83. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83> (in Russian).
12. Lübcke P., Bobrowski N., Arellano S., Galle B., Garzón G., Vogel L., Platt U. (2014) BrO/SO₂ Molar Ratios From Scanning DOAS Measurements in the NOVAC Network. *Solid Earth*, 5 (1), 409–424. <https://doi.org/10.5194/se-5-409-2014>.

Received: 18.04.2023

Accepted: 20.06.2023

Published online: 29.09.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-397-404>

UDC 691.32:69.04:693.554-486:691.327

Multi-Parameter Methodology for Assessing Quality Indicators of Nanomodified Fiber-Reinforced Concrete for Construction Site

S. N. Leonovich¹⁾, E. A. Sadovskaya¹⁾, A. A. Koleda¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Abstract. Nanomodified fiber-reinforced concrete is a building material for which the required characteristics of fracture toughness are a distinctive feature. Determination of the stress intensity factor of fiber-reinforced concrete makes it possible to correctly assess the resistance of the material during the formation and development of cracks. The proposed multi-parameter methodology for assessing the quality indicators of nanomodified fiber-reinforced concrete makes it possible to evaluate the quality of a fiber-reinforced concrete structure in construction and laboratory conditions. To carry out control at the construction site, modern and long-used methods of non-destructive testing are used: ultrasonic sounding, ultrasonic tomography, elastic rebound, separation with chipping. For laboratory studies, the technique provides for the manufacture of prism samples that can be molded or cut from the body of the structure. This methodology makes it possible to obtain in laboratory conditions such material parameters as tensile strength in bending, tensile strength in splitting, critical stress intensity factor for normal separation, critical stress intensity factor for transverse shear, energy consumption for individual stages of deformation and destruction of the sample, as well as to evaluate the uniformity of distribution fibers. Moreover, it is provided to obtain all the parameters on one sample from the series, which eliminates errors and inaccuracies in the quality indicators of the material associated with different conditions of hardening, molding, inaccuracies in duplicating the composition.

Keywords: crack resistance, nanomodified fibre-reinforced concrete, ultrasonic tomography, quality assessment technique, tensile strength, critical stress intensity factor

For citation: Leonovich S. N., Sadovskaya E. A., Koleda A. A. (2023) Multi-Parameter Methodology for Assessing Quality Indicators of Nanomodified Fiber-Reinforced Concrete for Construction Site. *Science and Technique*. 22 (5), 397–404. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-397-404>

Многопараметрическая методика оценки показателей качества наномодифицированного фибробетона для строительной площадки

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾, Е. А. Садовская¹⁾, А. А. Коледа¹⁾

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

Реферат. Наномодифицированный фибробетон – это строительный материал, отличительной особенностью которого являются требуемые характеристики трещиностойкости. Определение коэффициента интенсивности напряжений фибробетона дает возможность правильно оценить сопротивление материала при образовании и развитии трещин. Предлагаемая многопараметрическая методика оценки показателей качества наномодифицированного фибробетона позволяет оценить качество фибробетонной конструкции в строительных и лабораторных условиях. Для осуществления контроля на строительной площадке используют современные и давно применяемые методы неразрушающего

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

контроля: ультразвуковое зондирование, ультразвуковую томографию, упругий отскок, отрыв со скалыванием. Для лабораторных исследований методика предусматривает изготовление призматических образцов, которые могут быть отлиты в форму или вырезаны из тела конструкции. Эта методика позволяет получить в лабораторных условиях такие параметры материала, как прочность на изгиб, прочность при растяжении на раскалывание, коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге, энергозатраты на отдельные стадии деформации и разрушения образца, а также оценить равномерность распределения волокон. Более того, предусмотрено получение всех параметров на одном образце из серии, что исключает ошибки и неточности в показателях качества материала, связанные с различными условиями твердения, формования, погрешностями при дублировании состава.

Ключевые слова: трещиностойкость, наномодифицированный фибробетон, ультразвуковая томография, методика оценки качества, прочность при растяжении, коэффициент интенсивности напряжений

Для цитирования: Леонович, С. Н. Многопараметрическая методика оценки показателей качества наномодифицированного фибробетона для строительной площадки / С. Н. Леонович, Е. А. Садовская, А. А. Коледа // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 397–404. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-397-404>

Introduction

The stress intensity factor is one of the most important indicators of the crack resistance of a material such as fiber-reinforced concrete [1–3], since the ability of fiber-reinforced concrete to prevent crack development is the main advantage over conventional concrete [4–7]. For this reason, methods for determining this indicator should most fully disclose all the features of work under load and the quality of nanomodified fiber-reinforced concrete [8–10].

Nanomodified fibre-reinforced concrete is a composite material with dispersed reinforcement at different structural levels. Starting from the nanoscale level (carbon nanotubes) and up to the macroscale (traditional reinforcement), effective resistance to cracking under the action of external loads is assumed [1–3].

Of particular interest in construction is the quality control of the manufacture of structures in construction conditions. Since the basis of fiber-reinforced concrete is the concrete-matrix, the control methods used for monolithic concrete structures will also be applicable to nanofiber-reinforced concrete. Due to the fact that dispersed reinforcement does not significantly affect the change in compressive strength, which is one of the main quality indicators for ordinary concrete, the quality control method for nanomodified fiber-reinforced concrete should provide for obtaining parameters that characterize the properties of the material depending on the introduction of fiber fibers (crack resistance, fracture toughness, etc.).

In this article, the authors propose a technique that allows assessing the quality of a nanomodified

fiber-reinforced concrete structure and nanomodified fiber-reinforced concrete as a material (Fig. 1).

At the first stage, continuous control is performed by a combined (complex) method. As a result of measurements by the ultrasonic method and the elastic rebound method, the strength value of the concrete matrix is obtained. Sections (structures) with different (low) indicators are tested additionally at subsequent stages without fail.

At the second stage, ultrasound tomography of the structure is performed. This method allows you to determine the thickness of the structure and the adjacent base with one-way access, to detect voids and “hedgehogs” of fiber fibers. The control can be performed point and solid. Point control is mandatory on all structures. Continuous inspection can be carried out for structures with questionable strength indicators, defects (based on the results of point inspection).

At the third stage, the method of direct separation with chipping is used to determine the critical coefficient of stress intensity and strength of nanofibre concrete in the structure. This method is necessarily carried out in areas (structures) where defects, reduced strength, etc. were detected at previous stages of testing.

The fourth stage includes sampling of the material for subsequent tests in the laboratory. Test samples can be molded or cut from the body of the structure. In laboratory conditions, one sample from the series is subjected to step-by-step tests: bending tension, splitting tension, normal separation and transverse shear, non-destructive testing methods.

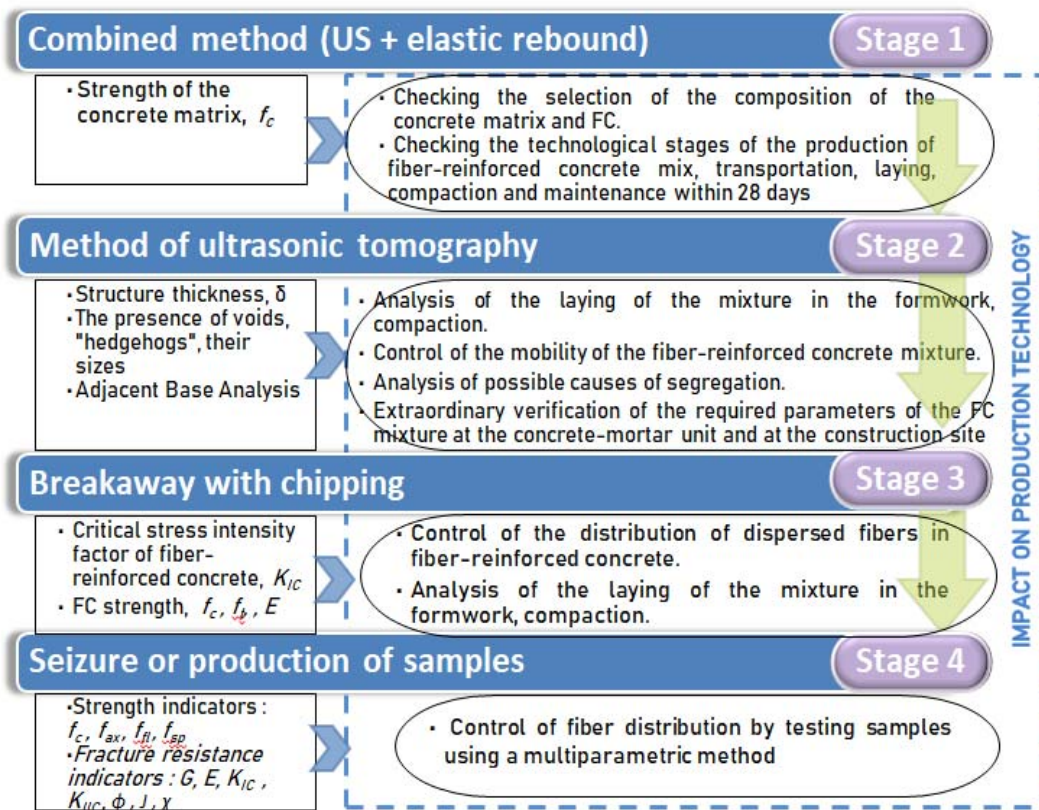


Fig. 1. The algorithm of quality control of fiber concrete in construction

Combined method

The purpose of this method is to determine the strength of the concrete matrix in the composition of the fiber-reinforced concrete material. The complex method for assessing the strength of nanofiber-reinforced concrete is based on the correction of data from the elastic rebound method according to STB 2264 and GOST 22690, an amendment that is a function of the difference in the strength estimates of nanofiber-reinforced concrete by the ultrasonic pulse method according to GOST 17624 and the elastic rebound method (Fig. 2–3). The ultrasonic pulsed method was used as a calibration method. It is used to correct the data of the dynamic indentation method [11].

In the same control zone, tests are carried out by the indentation method and the ultrasonic method; the values of the indirect parameters of these methods are I_1 and V_1 . The strength of nanofiber-reinforced concrete f_c of the control area is determined depending on the difference in the dynamic moduli of elasticity of the surface layer of nanofiber-reinforced concrete E_d^* and the inner area of nanofiber-reinforced concrete of the control area $E_{d,V}$ from the system of equations [12].

$$f_c = \frac{1}{1 + \Theta} \left(\Theta e^{0,091(E_v - E)} f_{c,I} + f_{c,V} \right); \quad (1)$$

$$\Theta = 0,0026 f_c^2 - 0,115 f_c + 2,79,$$

f_c – strength of nanofiber-reinforced concrete of the controlled section of the structure, MPa; $f_{c,I}$ и $f_{c,V}$ – respectively, the assessment of the strength of nanofiber-reinforced concrete by the indentation method and the ultrasonic pulse method, MPa; Θ – dimensionless coefficient.

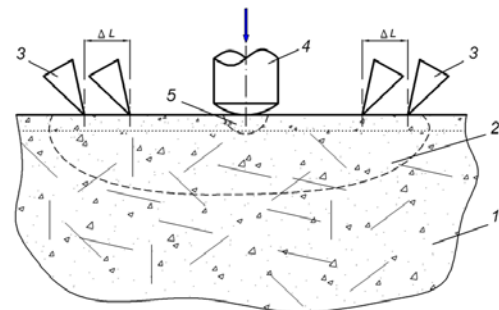


Fig. 2. Scheme of measurements by the combined method "indentation – ultrasonic pulse method" [11–13]:

1 – controlled item; 2 – area of concrete involved in the transmission of an ultrasonic pulse from the emitter to the receiver; 3 – emitting and receiving ultrasonic transducers; 4 – indenter; 5 – concrete indentation area

When testing by the method of elastic rebound, the distance from the places of testing to the reinforcement must be at least 50 mm. When performing selective control of monolithic fiber-reinforced concrete or nanofiber-reinforced concrete structures, it is necessary to test at least 60 % of the structures of the grip, floor, building [13].

The number and location of controlled areas during testing of structures may be indicated in the working drawings for monolithic structures and (or) technological control charts. Tests are carried out on a structure area with an area of 100 to 600 cm². The number of tests on the site is at least 5. The thickness of the structure on the test site must be at least 100 mm.

Control of nanofiber-reinforced concrete in a structure by ultrasonic tomography

The principle of operation of ultrasonic tomography devices is based on the emission of low-frequency sound vibrations. Ultrasound penetrates into the object under study and is reflected. Everything is recorded by a device that, with the help of special devices, converts simple data into a complex graphical display, which allows you to quickly read information [14–15].

To implement the method of ultrasonic tomography, an ultrasonic low-frequency tomograph A1040 MIRA can be used (Fig. 3). This device is designed to examine monolithic concrete (fiber-reinforced concrete) and reinforced concrete building structures in order to search for voids, channels, power fittings, foreign inclusions, delaminations, cracks and other cavities, both empty and

filled with liquid or solid material that differs from the surrounding concrete physically-mechanical properties [14–15].

The device uses the method of synthesized focusable aperture with Raman probing, in which ultrasound is focused into each point of the half-space. The data array is formed by collecting information from all measuring pairs of the antenna device of the tomograph. The signals received by the antenna array are processed on the builtin computer directly during operation.

The total area of the sites to be controlled must be at least 10% of the total area of the controlled surface. The number and location of controlled sections should be indicated by the design organization in the working drawings of structures, depending on the geometric dimensions, purpose and technology of their manufacture. The area for measurement should be no more than: for linear structures – one section per 4 m of length; for flat structures – one plot per 4 m² of area; for monolithic structures of solid walls – one section per 8 m² of area.

Determination of the strength and critical stress intensity factor of nanofiber-reinforced concrete by the direct separation method

The objective of this method is to determine the critical stress intensity factor of the nanofibre-reinforced concrete of the operated structure at normal separation. This method is based on the method of separation with chipping according to STB 2264 and GOST 22690 (Fig. 4).

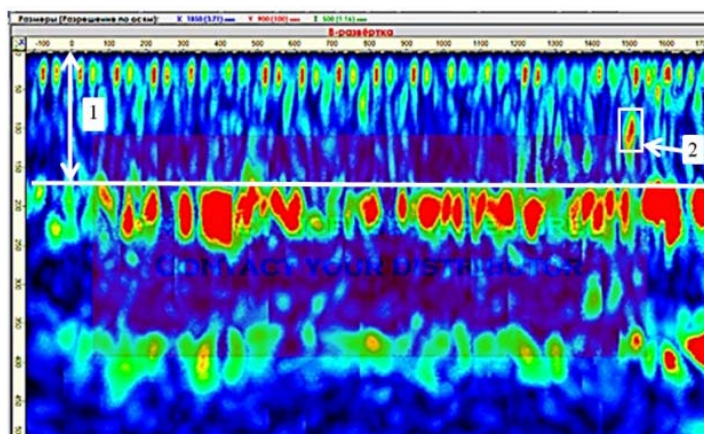


Fig. 3. Ultrasound tomography using the A1040 MIRA device in continuous scanning mode

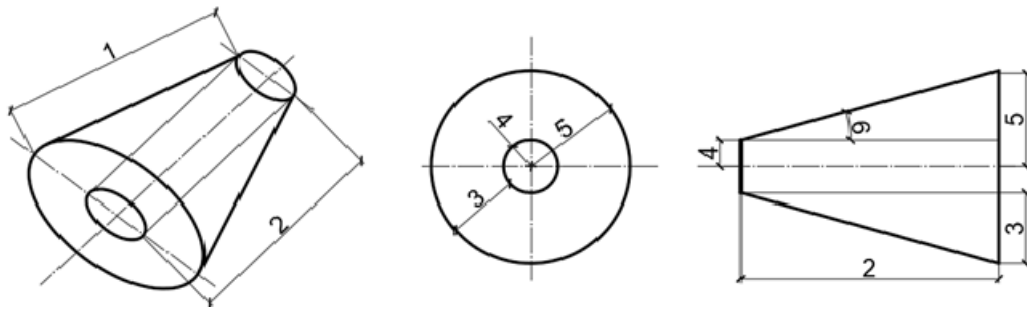


Fig. 4. Truncated fracture cone after separation with shearing: 1 – length of the generatrix of the fracture cone l ; 2 – borehole length h ; 3 – the difference between the maximum radius of the fracture cone and the radius of the borehole R ; 4 – borehole radius r_0 ; 5 – maximum radius of the fracture cone $r_{\max}$; 6 – the angle between the generatrix of the fracture cone and the side of the borehole α [16]

Depending on the stress intensity factor, directly in the structure, it is possible to predict such parameters of nanofiber-reinforced concrete as crack resistance, frost resistance, and durability of the material.

The method for determining the critical stress intensity factor of nanofibre-reinforced concrete is implemented as follows [17]. A special anchor device is installed in a hole drilled in a nanofiber-reinforced concrete mass with a radius r_0 , and a part of the nanofiber-reinforced concrete is pulled out by a press pump, such as GPNS (self-centering hydraulic press pump), in the form of a truncated cone with a maximum destruction radius $r_{\max}$ and the length of the hole h . The destruction occurs along the surface of the cone, the generatrix of which coincides with the area of principal stresses.

In the process of pulling out a microvolume directly from the structure in a given area, in addition to the magnitude of the force, the dimensions of the truncated fracture cone are determined: the radius r_0 , the length h of the hole, the length of the generatrix l of the fracture cone, and the critical stress intensity factor K_{IC} of nanofiber-reinforced concrete is calculated according to the formula [16]

$$K_{IC} = \frac{3P[\cos^2(90 - \alpha) - \sin^2(90 - \alpha)]\sqrt{2\pi l} \times}{2\pi h^2 \left(1 + \frac{r_0}{r_0 + h \tan \alpha}\right)^5} \times \left[\frac{0,8}{\left(\frac{R}{l}\right)^3 - 1} + 0,7 \right], \quad (2)$$

where P is the pull-out force, MN; α – the angle between the generatrix of the destruction cone and the side of the hole;

$$\alpha = \arctg\left(\frac{R}{h}\right). \quad (3)$$

When testing after the formation of cracks, the adhesion of the fiber to the concrete is broken, accompanied by the movement of the pulled-out microvolume relative to the body of the structure. The strength of nanofiber-reinforced concrete, which is a quality parameter, is determined by the magnitude of the force, and the calculation of the critical stress intensity factor is carried out taking into account the geometric parameters of the hole and the truncated fracture cone.

When testing by the pull-off method with shearing, the sections should be located in the zone of the lowest stresses caused by the operational load or the compression force of the prestressed reinforcement. The centers of the test sites must be at least 200 mm apart, and at least 150 mm from the edge of the structure.

Laboratory tests

A multi-parameter method for testing nanofiber-reinforced concrete in laboratory conditions makes it possible to determine the power and energy characteristics of crack resistance under static short-term loading (Fig. 5). The characteristics of crack resistance are determined during non-equilibrium mechanical tests [17].

The essence of this technique is to obtain all the declared quality indicators of nanofibre-reinforced concrete as a result of testing one sample from a series. A prism sample with a notch (stress initiator) is initially tested for tensile bending according to a four-point loading scheme (Fig. 6a). As a result of the test, the tensile strength value is determined and the complete deformation diagram is recorded. Based on the resulting deformation diagram, the energy indicators and the fracture toughness index, the quasi-static stress intensity factor (K_I) [18], are calculated.

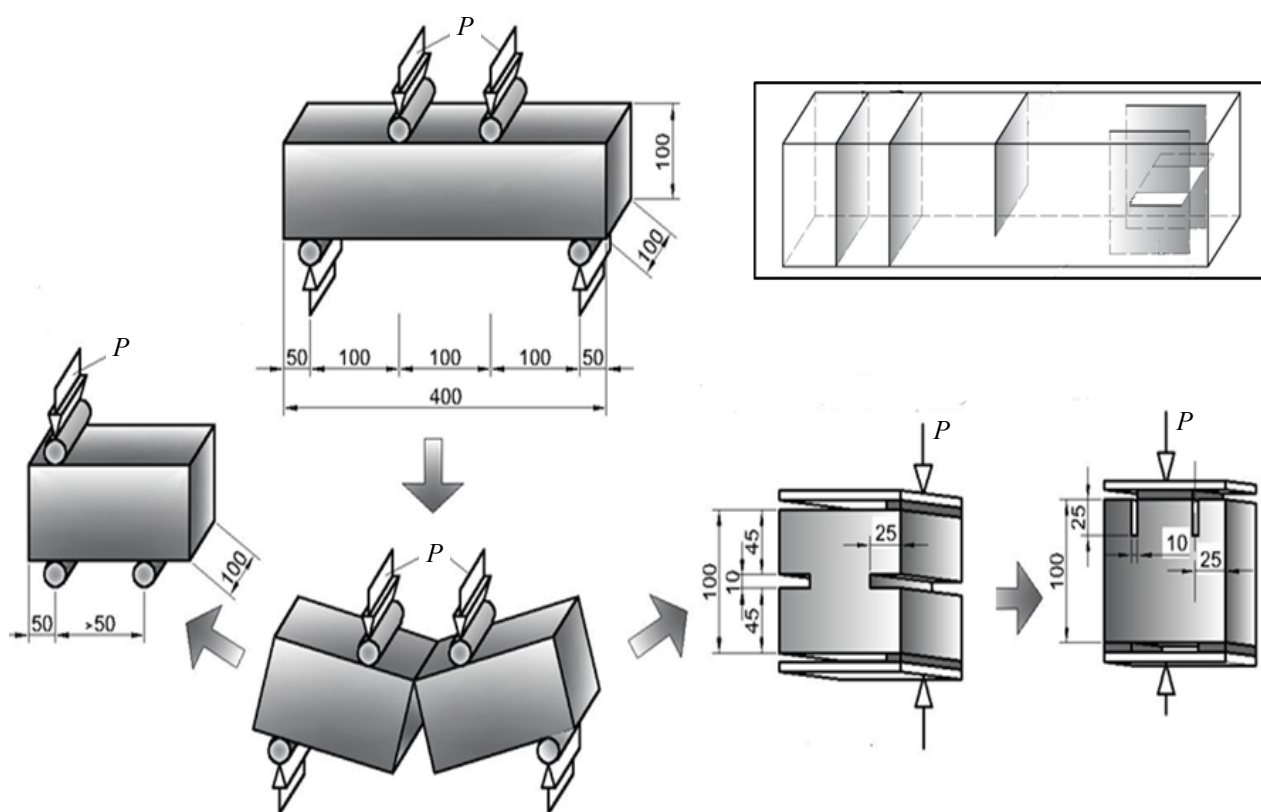


Fig. 5. Model of a multiparametric test procedure for nanofibre concrete in laboratory conditions

After the bending test, two halves of the prism specimen are formed, suitable for further tests. One half is tested for tension during splitting (Fig. 6b). The test procedure for splitting strength corresponds to the test procedure for tensile tests during splitting according to cube samples set out in GOST 10180. A sample-cube with crack initiators in the form of symmetrical cuts is formed from the second half using diamond-coated cutting tools. The resulting sample is tested for normal tear (Fig. 6c). Tests are carried out with eccentric compression. As a result of the test, the value of the critical stress intensity factor (for normal separation K_{IC} , $\text{MN/m}^{3/2}$) is determined [19].

After the normal pull test, two fragments (plates) are formed. On the obtained plates, using diamond-coated cutting tools, a stress concentration zone is made in the form of symmetrical cuts on one face of the product [18]. Plate samples are tested under central compression (Fig. 6d). As a result of the test, the value of the critical stress intensity factor (for transverse shear K_{IIc} (N/m^{3/2})) is determined [20].

For testing, prism specimens are made in accordance with the requirements of GOST 10180. The ratio of the height to width (diameter) of the specimen is assumed to be 4. The recommended dimensions of the prism are 100×100×400 mm, 150×150×600 mm. The presented technique makes it possible to obtain an estimate of the fracture toughness of nanofiber-reinforced concrete on one sample from a series, which eliminates errors and inaccuracies in the quality indicators of the material associated with different conditions of hardening, molding, and inaccuracies in duplicating the composition.

Table 1 shows the results of testing according to the proposed laboratory method of nanofibre-reinforced concrete samples-prisms in the construction laboratory “Atomstroyexport” (Russian Federation) at the construction site of the Belarusian NPP in the Republic of Belarus. The compositions of concrete mixtures used in the construction of the Belarusian nuclear power plant were taken as a basis.

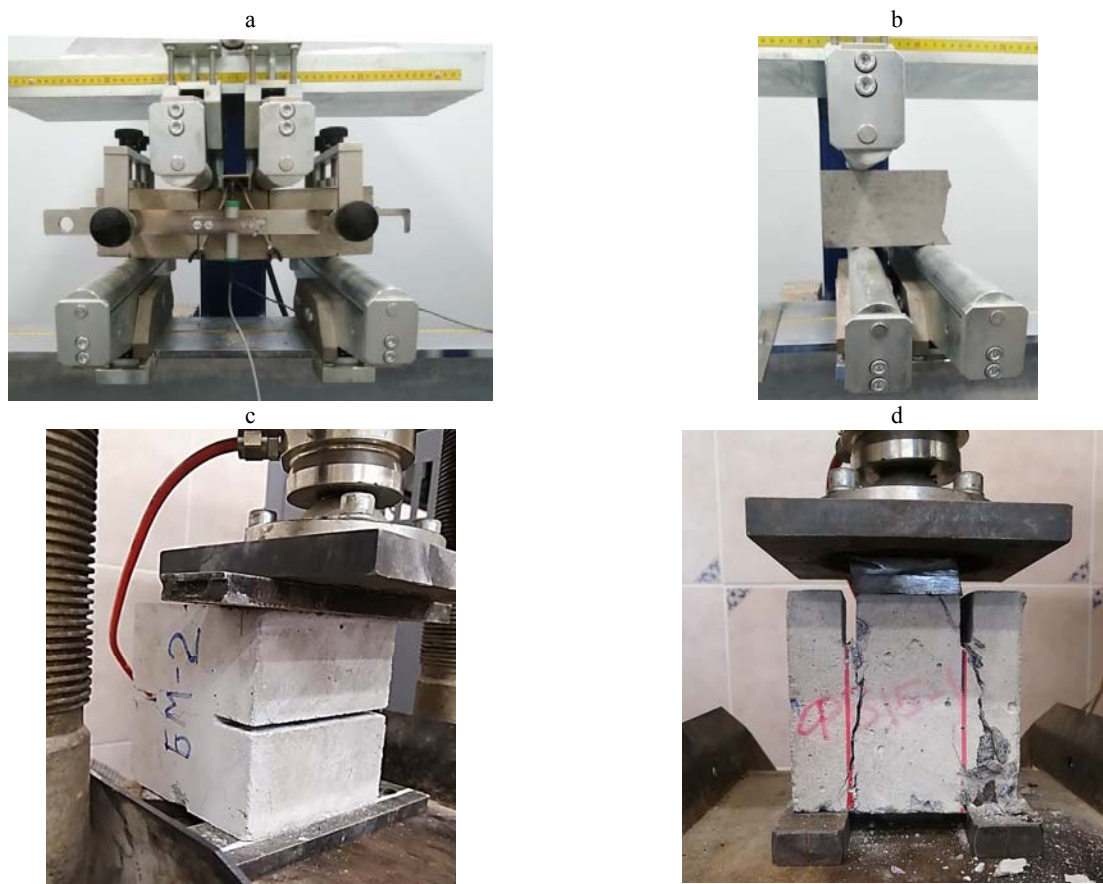


Fig. 6. Tests of nanofibre concrete in laboratory conditions: a – tensile in bending with registration of the fracture diagram; b – tensile during splitting; c – normal separation under eccentric compression; d – transverse shear

Table 1

Test results of nanofibre concrete samples

Options \ Fiber quantity (% by volume of the mixture)	Nanoconcrete matrix				
	Without fiber	Corrugated steel fiber (1 %)	Anchor steel fiber (1 %)	Fiber polymer wavy (1 %)	0.07 % basalt + + 0.26 % micro fiber steel straight + + 0.26 % steel anchor
Flexural elongation f_{fl} , MPa	2.8	5.9	9.4	6.2	4.2
Specific energy consumption G_b , J/m ²	208.9	800.58	1329.08	312.72	760.22
Tensile strength f_{sp} , MPa	1.7	3.1	3.2	2.8	2.3
Critical stress intensity factor K_{IC} , MN/m ^{3/2}	0.7	3.5	2.6	0.97	1.9
Critical stress intensity factor K_{IIIC} , MN/m ^{3/2}	3.9	3.7	7.2	4.5	5.8

CONCLUSIONS

The presented technique makes it possible to evaluate the quality of nanofibre-reinforced concrete in construction conditions. According to the described method, methods based on ultrasonic sounding, shock impulse and direct separation method are used. The combination of these methods allows obtaining indicators that complement

each other. So, a direct indicator of quality – the strength of nanofiber-reinforced concrete in a structure is determined by a complex method and a method based on the separation method. An indirect indicator – the speed of propagation of ultrasound (which characterizes the homogeneity of the material) is determined by a complex method and the method of ultrasonic tomography. The laboratory tests use a combination of well-

known widely used standardized test methods. The characteristics of crack resistance determined by the proposed method (along with other characteristics of mechanical properties) can be used for:

- comparison of different options for the composition, technological processes of manufacturing and quality control of nanofiber-reinforced concrete;
- comparison of nanofiber-reinforced concretes in substantiating their choice for structures;
- calculations of structures, taking into account their defectiveness and operating conditions;
- analysis of the causes of structural failures.

REFERENCES

1. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. (2022) Optimization of Composition of Nanofiber Concrete in Terms of Fracture Toughness by Matrix Modification. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 21 (6), 499–503 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503>.
2. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Polonina E. N. (2020) Tensile Strength of Nanofibrous Concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (4), 1015–1019. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02202-8>.
3. Koleda E. A., Leonovich S. N., Zhdanok S. A. (2018) Results of tensile tests of Nanofibre Concrete with Complex Fiber Reinforcement. *Vestnik Povolzhskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta. Ser.: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii = Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Materials. Constructions. Technologies"*, (2), 16–23 (in Russian).
4. Koleda E. A., Leonovich S. N. (2016) Non-Destructive Quality Control of Fiber-Reinforced Concrete Structures as a Component of the Risk Monitoring System During the Operation of a Production Facility. *Sistemnye Tekhnologii = System Technologies*, (2), 85–95 (in Russian).
5. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Potapov V. V. (2022) Fracture Toughness of Nanofiber-Reinforced Concrete on Normal Separation and In-Plane Shear. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 95 (4), 945–952. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02551-6>.
6. Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Sadovskaya E. A., Budrevich N. A. (2021) Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 20 (3), 189–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>.
7. Xuesen Li, Jie Dai, Mingke Deng (2021) Shear Behavior of High Ductile Fiber Reinforced Concrete Beams. *Alexandria Engineering Journal*, 60 (1), 1665–1675. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.017>.
8. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2019) Physicomechanical Characteristics of Concrete Modified by a Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (1), 12–18. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01902-0>.
9. Bazhenov Yu. M., Chernyshov E. M., Korotkikh D. N. (2014) Construction of Modern Concrete Structures: Defining Principles and Technological Platforms. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, (3), 6–14 (in Russian).
10. Congro M., Sanchez E.C.M., Roehl D., Marangon E. (2019) Fracture Modeling of Fiber Reinforced Concrete in a Multiscale Approach. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106958. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106958>.
11. Leonovich S. N., Sadovskaya E. A. (2022) Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 21 (5), 392–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-392-396>.
12. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2017) Multiwave Ultrasonic Control of Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (4), 289–297 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-289-297>.
13. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2012) Improving the Reliability of the Control of Concrete Strength by Non-Destructive Methods Based on Their Combination. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, (1), 25–32 (in Russian).
14. Shevaldykin V. G., Samokrutov A. A., Kozlov V. N. (2003) Ultrasonic Low-Frequency Piezoelectric Transducers with Dry Point Contact and their Application for Non-Destructive Testing. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, (2), 30–39 (in Russian).
15. Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. (2002) Ultrasonic Flaw Detection of Concrete by the Echo Method: State and Prospects. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, (2), 6–10 (in Russian).
16. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-Compacting Concrete Mix on its Technological Properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (2), 376–382. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01941-7>.
17. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Polonina E. N., Zhdanok S. A. (2020) Method of Quality Control of Steel Fiber Reinforced Concrete by Stress Intensity Factor at Normal Separation. *Povedenie Betonov i Zhelezobetonnykh Konstruktsii Pri Nalichii Nagruzok i Teplovlazhnostnykh Vozdeistviy Razlichnoi Dlitel'nosti: Elektronnyi Sbornik Nauchnykh Trudov Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf. [Behavior of Concrete and Reinforced Concrete Structures in the Presence of Loads and Heat and Moisture Influences of Various Durations: Electronic Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Technical Conference]. Makeevka, DONNASA*, 47–52 (in Russian).
18. Leonovich S. N., Zverev V. F., Litvinovsky D. A. Brittle Fracture Criteria for High-Strength Concrete. *Mekhanika Razrusheniya Stroitel'nykh Materialov i Konstruktsii: Materialy VIII Akademicheskikh Materii RAASN. [Fracture Mechanics of Building Materials and Structures. Proceedings of the 8th Academic Readings of the RAASN Russian Academy of Architecture and Construction Sciences]. Kazan, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)*, 169–173 (in Russian).
19. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A. (2021) Method for Determining the Critical Stress Intensity Factor of High-Strength Concrete. Patent of the Republic of Belarus No 16194 (in Russian).
20. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A., Kim L. V. (2017) Method for Determining the Critical Stress Intensity Factor of High-Strength Concrete. Patent RU 2621618 (in Russian).

Received: 13.06.2023

Accepted: 31.08.2023

Published online: 29.09.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-405-410>

UDC 620.91; 621.383.4

Study of Vertically Oriented Solar Battery by Exposure of Concentrated Solar Radiation

A. K. Esman¹⁾, G. L. Zykov¹⁾, V. A. Potachits¹⁾, V. K. Kuleshov¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Abstract. Solar power is one of the largest sectors of the global electric and heat power industry. In search of new energy sources, scientists and engineers around the world are increasingly turning their attention to solar batteries, which can be a suitable replacement for non-renewable energy sources. Vertically oriented solar batteries will generate electricity throughout the daylight hours, which eliminates use of additional equipment. The paper proposes a 3D model of a solar battery with a vertical orientation of its modules, as well as the calculation and evaluation of temperature characteristics and the range of efficiency variations obtained under conditions of both the diurnal and seasonal changes in ambient temperature, and the power density changes of concentrated solar radiation, the maximum values of which were chosen equal to 1; 5 and 10 kW/m². The dependences of the maximum values of the solar battery temperature and the temperature gradient inside it, as well as the dependences of the minimum, average and maximum values of the radiative heat flux to the solar battery surface in the presence and absence of temperature stabilization of the heat sink backside versus the time of day in the middle of January and July have been plotted. As calculations have shown, at the solar radiation concentration of 10 kW/m², the efficiency in July is increased by more than 2 times due to the use of thermoelectric converters in the battery. Moreover, according to the obtained results, when the solar modules are oriented vertically, temperature gradients and, consequently, the total efficiency of the solar battery and power generation time will be greater compared to the horizontal position of the solar modules, which will reduce operational costs.

Keywords: solar battery, solar module, 3D model, COMSOL Multiphysics, heat transfer, temperature stabilization, temperature gradient, radiative heat flux, efficiency

For citation: Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2023) Study of Vertically Oriented Solar Battery by Exposure of Concentrated Solar Radiation. *Science and Technique*. 22 (5). 405–410. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-405-410>

Исследование вертикально ориентированной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения

Докт. физ.-мат. наук А. К. Есман¹⁾,
кандидаты физ.-мат. наук, доценты Г. Л. Зыков¹⁾, В. А. Потачиц¹⁾,
канд. техн. наук В. К. Кулешов¹⁾

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

Реферат. Солнечная энергетика является одним из крупнейших секторов мировой электро- и теплоэнергетики. В поисках новых источников энергии ученые и инженеры всего мира все чаще обращают внимание на солнечные

Адрес для переписки

Есман Александр Константинович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-50
ak_esman@bntu.by

Address for correspondence

Esman Alexander K.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-50
ak_esman@bntu.by

батарей, которые могут стать подходящей заменой невозобновляемых источников энергии. Вертикально ориентированные солнечные батареи позволят генерировать электроэнергию в течение всего светового дня, что исключает использование дополнительного оборудования. В статье предлагаются 3D модель солнечной батареи с вертикальной ориентацией ее модулей, а также расчет и оценка температурных характеристик и диапазон вариаций КПД, получаемых в условиях как суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды, так и изменений плотности мощности концентрированного солнечного излучения, максимальные значения которой были выбраны равными 1; 5 и 10 кВт/м². Построены зависимости максимальных значений температуры солнечной батареи и градиента температуры внутри нее, а также зависимости минимальных, средних и максимальных значений лучистого теплового потока к поверхности солнечной батареи при наличии и отсутствии стабилизации температуры тыльной стороны радиатора от времени суток в середине января и июля. Как показали расчеты, при концентрации солнечного излучения 10 кВт/м² КПД в июле увеличивается более чем в два раза за счет использования в батарее термоэлектрических преобразователей. Более того, согласно полученным результатам, при вертикальной ориентации солнечных модулей градиенты температуры и, следовательно, суммарный КПД солнечной батареи и время генерации энергии будут больше по сравнению с горизонтальным положением солнечных модулей, что позволит снизить эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: солнечная батарея, солнечный модуль, трехмерная модель, COMSOL Multiphysics, теплопередача, стабилизация температуры, градиент температуры, лучистый тепловой поток, коэффициент полезного действия

Для цитирования: Исследование вертикально ориентированной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения / А. К. Есман [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 405–410. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-405-410>

Introduction

In the next few decades, the Sun may well become a major source of energy. Solar power is the largest sector of the global electric and heat power industry in terms of the amount of annually attracted investment and commissioned capacities. For example, in 2015, the amount of commissioned new capacities of renewable energy sources exceeded the total amount of newly commissioned capacities of coal and gas plants [1]. In 2017, the cost of solar and wind energy was \$0.056 and \$0.014 per kilowatt-hour, respectively. At the same time, the cost of a kilowatt-hour of energy from gas and coal is more than 6 cents [2]. In the search for new energy sources, scientists and engineers from around the world are increasingly focused on solar batteries and electric power plants, which can be a suitable replacement for non-renewable energy sources. Nowadays, the use of solar batteries is increasingly urgent, when oil and gas reserves are gradually running out, and their price is increasing. The use of solar energy is beneficial not only for consumers, but also for the ecology of the planet as a whole.

Usually in the middle of the day, the solar radiation energy converted into electricity exceeds needs. Therefore, it must be stored for future use, which requires additional equipment. Vertical oriented solar batteries will generate electricity throughout the daylight hours. This eliminates the use of the mentioned above equipment [3].

The purpose of this paper is to build a 3D model of the photoelectric converter with vertical orientation of its modules in the simulation software environment and to estimate its main parameters under real operating conditions.

Construction of the vertically oriented solar battery

The structure of the proposed solar battery is shown in the Fig. 1 [4].

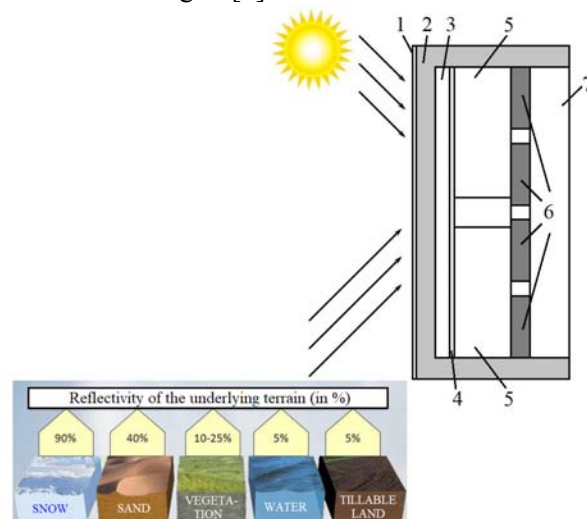


Fig. 1. Structure of the solar battery with vertical orientation of its modules: 1 – silicon oxide nanofilm; 2 – silicate glass case; 3 – sealant; 4 – solar module; 5 – battery of thermal diodes; 6 – battery of thermoelectric converters; 7 – heat sink

The solar battery contains a heat sink 7 with vertical slots thermally connected to the backside

of a vertically mounted solar module 4 through a battery of thermal diodes 5 and thermoelectric converters (TEC) 6, and the front side of the solar modules 4 mechanically and optically connected to the silicate glass case 2 through sealant 3, the refractive index n of which is selected from the interval:

$$n_{SG} < n < n_{SM}, \quad (1)$$

where n_{SG} and n_{SM} are the refractive indices of the silicate glass and the solar modules, respectively, and a silicon oxide nanofilm 1 is located on the outer vertical surface of the case 2.

Silicon oxide nanofilm 1 ($(x = 100 \text{ nm}) \times (y = 178 \text{ mm}) \times (z = 178 \text{ mm})$ in size, see Fig. 1) is a silicon oxide nanoparticles film which is fabricated from an industrially produced layer of colloidal solution and is firmly attached to a silicate glass case 2 ($(x = 4 \text{ mm}) \times (y = 178 \text{ mm}) \times (z = 178 \text{ mm})$ in size), while forming a continuous layer of nanoscale tubercles, self-ordered into a structure that does not allow both water droplets and dust particles to stay on it. Sealant 3 is a silicone transparent self-polymerizing adhesive with refractive index n , which is chosen according to expression (1), so that the silicate glass case 2 together with sealant 3 are antireflective coating for solar modules 4 ($(x = 0.2 \text{ mm}) \times (y = 178 \text{ mm}) \times (z = 166 \text{ mm})$ in size) with minimum reflection of the solar radiation. Solar module 4 is a set of standard solar cells (SCs) based on monocrystalline silicon. A battery of thermal diodes 5 consists of cells that perform on the basis of heat pipes and conduct heat in one direction. A battery of thermoelectric converters 6 (each of the converters has dimensions: $(x = 3.8 \text{ mm}) \times (y = 178 \text{ mm}) \times (z = 39.25 \text{ mm})$) is a standard battery of Peltier cells. The gap between the TECs is chosen to be 3 mm. The heat sink 7 is made of aluminum alloy D16T.

Operation algorithm of the vertically oriented solar battery

At first, the SCs of the solar module 4 are mounted vertically, turning their front sides in the south direction. Input solar radiation falls on the silicon oxide nanofilm 1 both directly and after reflection from the flat underlying terrain (e. g., a lake). Passing sequentially through the silicon oxide nanofilm 1, silicate glass case 2 and sealant 3, it reaches the SCs of the solar module 4 and is absorbed in its photosensitive structures. Depen-

ding on the type of the used SCs, the 22 – 15 % of the incoming solar radiation energy is converted into the electric current, and the remaining part of this energy is converted into the heat, which enters to the hot junctions of the battery of thermoelectric converters 6 through a battery of thermal diodes 5. The temperature of the cold junctions of the battery of thermoelectric converters 6 is maintained near the ambient temperature by the heat sink 7 thermally connected to them. As a result, the thermal energy is also converted into electricity in the battery of thermoelectric converters 6. More effective dissipation of heat energy into the environment and thereby the equalization of the heat sink temperature to the ambient temperature is provided by the vertical slots of the heat sink 7. Water particles (rain, fog) on the surface of silicon oxide nanofilm 1 touch it with only a small part of the surface, thereby reducing Van der Waals forces and allowing the surface tension forces to compress them into balls, which easily roll down over the vertical surface, taking particles of dirt, dust, etc. with them.

In the proposed design of the solar battery with vertical orientation of the SCs 4, solar radiation is converted into electrical energy more efficiently both by recycling the heat released by SCs 4 and by the solar radiation concentration by the underlying terrain (Fig. 1). Moreover, the conversion efficiency of the proposed solar battery increases both due to the operation of the battery of TECs 6, as well as during sunsets, because at these times the battery of thermal diodes 5 will maintain the same direction of heat flow. In addition, the considered solar battery with vertical orientation of SCs 4 has the self-cleaning property of the input aperture. This property excludes the cleaning of the device.

Computer simulation

For the development and implement of the solar battery, we used the COMSOL Multiphysics [5–8]. The temperature characteristics and range of efficiency variations were calculated in the presence and absence of temperature stabilization of the backside of the heat sink 7. Diurnal and seasonal variations of both the ambient temperature and solar radiation power density with maximum values of 1, 5 and 10 kW/m² were taken into account in the simulation for the geographic coordinates of Minsk (Fig. 2).

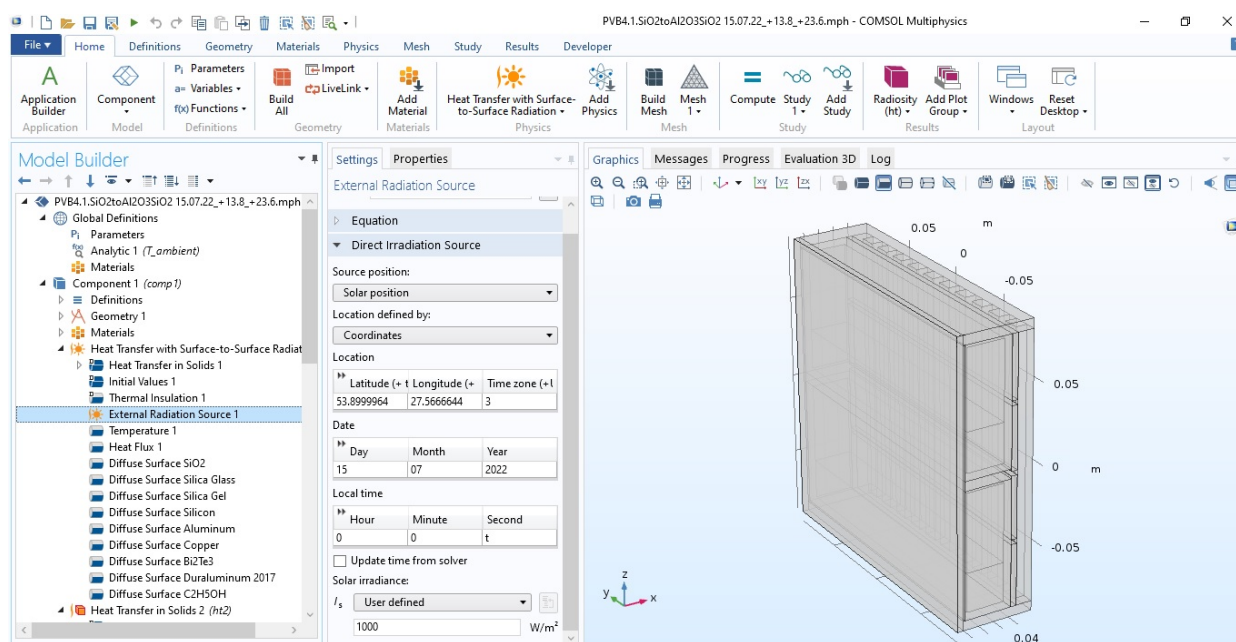


Fig. 2. Screenshot of the COMSOL Multiphysics setup window using the Solar Position option

The diurnal variation curve is close to a sinusoidal distribution around the average air temperature:

$$T_{\text{amb}}(t) = T_{\text{av}} + \Delta T \cos\left(2\pi \frac{t-14}{24}\right),$$

where T_{av} and ΔT are the average temperature and half diurnal temperature variation, respectively; t is the time in hours.

The solar battery with vertical orientation of the SCs was divided into finite elements (Fig. 3).

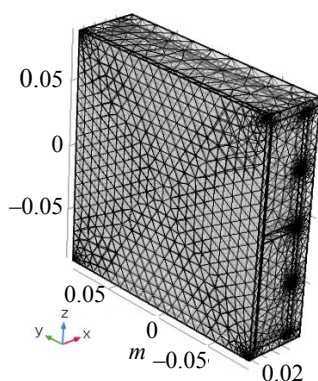


Fig. 3. Screenshot of the grid construction of the solar battery in the COMSOL Multiphysics software

Analysis of the results

While in operation of the solar battery with vertical orientation of the SCs under conditions of ambient temperature variation and solar radiation

exposure, there is uneven heating of both its surface and internal layers. The maximum power density was 1 kW/m^2 . Stabilization of the heat sink backside temperature at $(T_{\text{amb}} + 4^\circ\text{C})$, where T_{amb} – ambient temperature, leads to a decrease of battery temperature by 5.5°C in January and by 3.8°C in July during daylight hours (Fig. 4). As can be seen from Fig. 4, the temperature stabilization reduces the operating temperature range of the solar battery from 18.5°C (from -6°C to $+12.5^\circ\text{C}$, see Fig. 4a, curve 3) to 9.3°C (from -2°C to $+7.3^\circ\text{C}$, see Fig. 4a, curve 2) in January and lowers its maximum temperature values from $+36.8$ to $+33^\circ\text{C}$ in July (Fig. 4b, curves 2' and 3'). The radiative heat flux to the solar battery surface versus the time of day is shown in Fig. 5. Calculations have shown that in the middle of January the radiative heat flux to the solar battery surface reaches maximum values of 1.6 kW/m^2 at about 13 o'clock (Fig. 5a, curve 3), and in the middle of July its maximum values of 1.46 and 1.57 kW/m^2 are reached at about 8 o'clock and at a half past 18 o'clock, correspondingly (Fig. 5b, curves 2, 2', 3 and 3'). In this case, the radiative heat flux is lower during the day time. This is due to the fact that the temperature of all battery cells equalizes and the temperature gradient becomes smaller by mid-day in the middle of July. The temperature stabilization of the heat sink backside has no significant effect on the radiative heat flux both in January and July (Fig. 5).

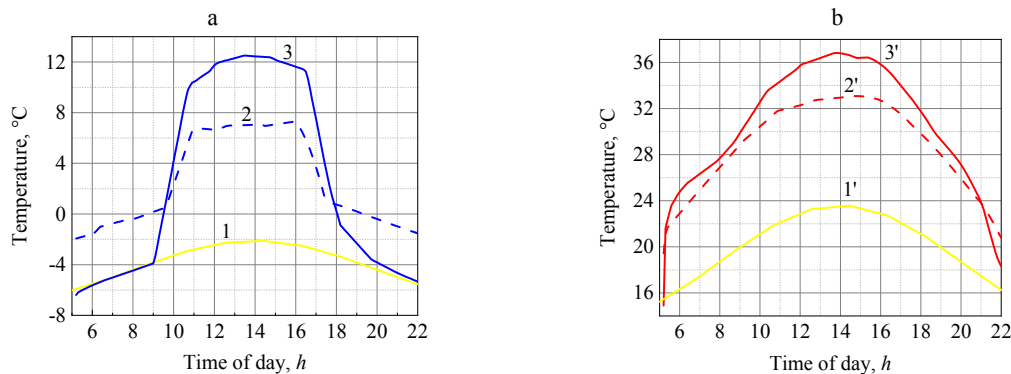


Fig. 4. The average ambient temperature (curves 1 and 1') and the maximum temperature of the solar battery with (curves 2 and 2') and without (curves 3 and 3') the temperature stabilization of the heat sink backside versus the time of day in the middle of: a – January; b – July

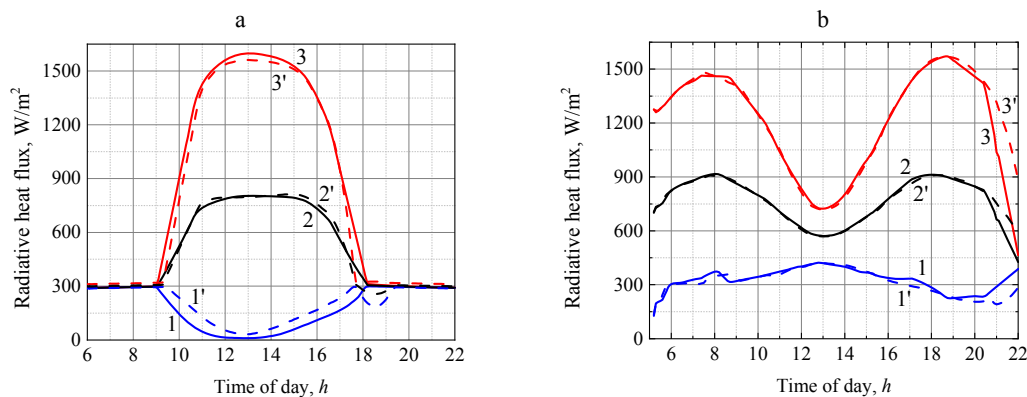


Fig. 5. The minimum (curves 1 and 1'), average (curves 2 and 2') and maximum (curves 3 and 3') values of the radiative heat flux to the surface of the solar battery with (curves 1, 2 and 3) and without (curves 1', 2' and 3') the temperature stabilization of the heat sink backside versus the time of day in the middle of: a – January; b – July

Fig. 6 shows the diurnal changes in the temperature gradient inside the solar battery under conditions of the solar irradiation exposure with the maximum power density of 1 kW/m^2 in January (curves 1 and 1') and July (curves 2 and 2'). As follows from the graphs (Fig. 6), the maximum temperature gradient values of, respectively, 0.4×10^5 and $0.48 \times 10^5 \text{ K/m}$ are reached inside the solar battery with and without the temperature stabilization of the heat sink backside at about 11 o'clock in the middle of January. In the middle of July, the maximum temperature gradient values of 1.14×10^5 and $1.17 \times 10^5 \text{ K/m}$ are reached inside the solar battery with and without the temperature stabilization of the heat sink backside at about 7 o'clock. This is due to the thermophysical properties of the TECs of solar battery and the temperature difference on their surfaces under conditions of changing ambient temperature. In July, the maximum values of the temperature gradient are about 35–40 % higher than in January (Fig. 6). Temperature stabilization of the heat sink backside increases the temperature gradient by about 20 % in the middle of January and by about 2.7 % in the middle of July. Due to the fact

that the daylight hours in July are longer than in January, the total energy gain, obtained throughout the day in July, is greater than in January due to the presence of TEC in the solar battery.

Achieved maximum temperature gradients (Fig. 6) between the internal and external surfaces of TECs of the solar battery under solar radiation exposure lead to the fact that the potential difference generated between these electrodes also reaches maximum values in the morning and in the middle of day in January and in July. This leads to an increase in the efficiency of the device as a whole.

For solar batteries with monocrystalline silicon modules with an efficiency of 22 % at 25°C , the temperature coefficient of power reduction was $-0.25\%/\text{C}$, when these batteries are illuminated by a radiation flux of 1400 W/m^2 with a spectrum close to the solar spectrum [9].

Therefore, in the middle of the day in January, the solar battery will work with maximum efficiency, while in July at its temperature of 36°C , solar battery without a concentration of solar insolation will work with an efficiency of 19.3 % and 20.3 %, correspondingly, in the absence and

presence of thermal stabilization of the heat sink backside.

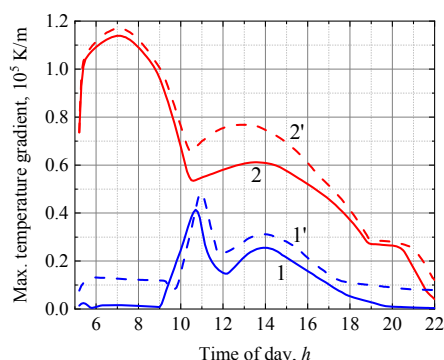


Fig. 6. The maximum temperature gradient inside the solar battery with (curves 1' and 2') and without (curves 1 and 2) the temperature stabilization of the heat sink backside versus the time of day in the middle of January (curves 1 and 1') and July (curves 2 and 2')

Moreover, in summer morning (until about 7 a. m.) and in summer evening (after about 10 p. m.) solar batteries work with an efficiency of 22 %, when they have not yet warmed or have already cooled down (Fig. 4).

The temperature of the solar battery with the temperature stabilization of the heat sink backside under solar radiation exposure with the maximum power density of 10 kW/m^2 is 68.6 and 96.4 °C in the middle of January and July, respectively. In this case, the efficiency of the solar battery is 11.1 and 4.2 % in the middle of January and July, respectively. Developed low-temperature TECs for the temperature range of 30–300 °C have an efficiency of 5.3 % [10], so when using them without a concentration of solar insolation, the total efficiency of the device in July will be more than 23 %, and in January will be less than 26 %. The efficiency of the device under a solar concentration of 10 Suns will reach values of 9.3 % and 15.8 % in July and January, respectively. The total efficiency values are obtained taking into account that the heat flux is calculated by considering the current level of photogeneration.

CONCLUSION

The proposed solar battery with vertical orientation of the solar cells was developed in the COMSOL Multiphysics software. The temperature characteristics was calculated under conditions of diurnal and seasonal changes of the ambient temperature and the solar power density, the maximum values of which chosen to be 1; 5 and 10 kW/m^2 . According to the calculations, the efficiency of the solar battery under exposure of solar radiation with maximum of the considered concentrations in July increases by more

than 2 times due to the use of the TECs in the battery. Moreover, according to the results, the temperature gradients and, consequently, the total efficiency of the solar battery and the time of energy generation will be greater in the case of vertical orientation of the solar cells as compared with to the its horizontal orientation, such as on the roof [7, 8].

Using the vertical orientation of the solar cells in addition to the optimization of the energy generation levels during the day will reduce the operating costs associated with cleaning the solar batteries and replacing them after external effects.

REFERENCES

1. Bekulova S. R. (2020) The Formation of an Institutional Environment that Promotes the Development of Renewable Energy in Russia. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekonomika = Theoretical and Applied Economics*, 4, 66–80 (in Russian).
2. Tishkov S. V., Shcherbak A. P. (2019) Directions for the Development of Renewable Energy and its Role in the Socio-Economic Development of the Regions of the Northwestern Federal District. *Trendy i Upravlenie = Trends and Management*, (2), 11–18. <https://doi.org/10.7256/2454-0730.2019.2.29408> (in Russian).
3. Reker S., Schneider J., Gerhards C. (2022) Investigation of Vertical Solar Power Plants Into a Future German Energy System. *Smart Energy*, 7, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083>.
4. Esman A. K., Kuleshov V. K., Shpektor M. V. (2011) *Solar Battery*. Patent of the Republic of Belarus No 7713 (in Russian).
5. *Heat Transfer Module. Analyze Thermal Effects with Advanced Simulation Software*. Available at: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (accessed 29 April 2023).
6. Esman A. K., Potachits V. A., Zykov G. L. (2018) Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe_2 . *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
7. Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2020) Simulation of thin-Film Solar Cells with a CuInSe_2 Chalcopyrite Structure. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.*, 63 (1), 5–13.
8. Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2021) Simulation of Photovoltaic Thermoelectric Battery Characteristics. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 250–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258>.
9. Gulkov V. N., Kolesnichenko I. D., Korotkov K. E. (2019) Investigation of the Effect of Heating Solar Modules on the Efficiency of Radiation Conversion. *Izvestiya SPbGETU "LETI" = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University Journal*, (1), 10–16 (in Russian).
10. Sorokin A. I. (2017) Segmented Thermoelectric Unicouple for an Operating Temperature Range of 30–320 °C. *Semiconductors*, 51 (7), 847–849.

Received: 30.06.2023

Accepted: 31.08.2023

Published online: 29.09.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417>

УДК 621.316.925

Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений в цифровых органах сопротивления

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. А. Ромانيук¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты В. Ю. Румянцев¹⁾, И. В. Новаш¹⁾,
канд. техн. наук Ю. В. Румянцев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В микропроцессорных дистанционных защитах линий цифровые органы сопротивления используются в качестве измерительных для определения компонентов вектора входного сопротивления и последующего их математического сравнения с границами выбранных характеристик срабатывания. Значения компонентов вектора сопротивления вычисляются по измеренным в месте установки защиты напряжениям и токам. Наиболее распространенными являются алгоритмы дистанционных измерений входного сопротивления на основе: двух выборок мгновенных значений напряжения и тока линии; модели линии; использования ортогональных составляющих напряжения и тока. В органах сопротивления современных микропроцессорных защит линий для дистанционных измерений наиболее широко применяется последний из вышеназванных алгоритмов. Его динамические свойства определяются главным образом реализуемым методом формирования ортогональных составляющих входных сигналов. В измерительных органах дистанционных защит для этой цели преимущественно используются нерекursивные цифровые фильтры Фурье. Для улучшения динамических свойств алгоритма дистанционных измерений на их основе предложено дополнительно осуществлять коррекцию динамических погрешностей в переходных режимах. В среде динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems реализована цифровая модель, позволяющая осуществлять сравнительную оценку динамических свойств предложенного алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления по результатам вычислительного эксперимента. Результаты исследований показали, что предложенный алгоритм дистанционных измерений входного сопротивления обладает более высокими динамическими свойствами по сравнению с известными.

Ключевые слова: дистанционные измерения, орган сопротивления, динамические свойства, алгоритм измерений, модель, MATLAB-Simulink-SimPowerSystems, тестовые воздействия, результаты исследований

Для цитирования: Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений в цифровых органах сопротивления / Ф. А. Романиук [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 411–417. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417>

Dynamic Properties of Remote Sensing Algorithm in Digital Resistance Elements

F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, I. V. Novash¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾

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

Abstract. In microprocessor-based distance protection of lines, digital resistance elements are used as measuring instruments for determining the components of the input resistance vector and their subsequent mathematical comparison with

Адрес для переписки

Румянцев Владимир Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

Address for correspondence

Rumiantsev Vladimir Yu.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

the boundaries of the selected response characteristics. The values of the resistance vector components are calculated from the voltages and currents measured at the installation site of the protection. The most common are algorithms for remote measurements of input resistance based on: two samples of instantaneous values of line voltage and current; line models; using orthogonal voltage components and current. In the resistance elements of modern microprocessor line protections for remote measurements, the last of the above algorithms is most widely used. Its dynamic properties are determined mainly by the implemented method of generating the orthogonal components of the input signals. In distance protection measuring device, non-recursive digital Fourier filters are predominantly used for this purpose. To improve the dynamic properties of the remote measurement algorithm based on them, it is proposed to correct additionally dynamic errors in transient modes. In the dynamic modeling environment MATLAB-Simulink-SimPowerSystems, digital model is implemented that allows for a comparative assessment of the dynamic properties of the proposed algorithm for remote measurements of input resistance based on the results of a computational experiment. The research results have shown that the proposed algorithm for remote measurements of input resistance has higher dynamic properties compared to the known ones.

Keywords: remote measurements, resistance element, dynamic properties, measurement algorithm, model, MATLAB-Simulink-SimPowerSystems, test influences, research results

For citation: F. A. Romaniuk, V. Yu. Rumiantsev, I. V. Novash, Yu. V. Rumiantsev (2023) Dynamic Properties of Remote Sensing Algorithm in Digital Resistance Elements. *Science and Technique*. 22 (5), 411–417. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417> (in Russian)

Введение

Цифровые органы сопротивления используются в микропроцессорных дистанционных защитах ЛЭП в качестве измерительных для определения компонентов (R , X) вектора входного сопротивления $\dot{Z}_{вх}$ и последующего их математического сравнения с границами выбранных характеристик срабатывания [1]. Значения R и X вычисляются по измеренным в месте установки защиты напряжению и току. Для выполнения измерительных органов сопротивления (ИОС) защит от многофазных коротких замыканий (КЗ) в одной точке вполне приемлемыми свойствами обладают пофазные органы, включаемые на полные междупазные напряжения и соответствующие им разности фазных токов [2].

Наиболее распространенными и используемыми в цифровых ИОС являются алгоритмы цифровых измерений входного сопротивления [3] на основе:

- двух выборок мгновенных значений напряжения и тока линии;
- модели линии;
- использования ортогональных составляющих (ОС) первых гармоник напряжения и тока линии.

Первый из вышеуказанных алгоритмов в частном случае при частоте входных сигналов 50 Гц и шаге их дискретизации $\Delta t = 0,005$ с отличается достаточно простыми выражениями

для R и X . Он является быстродействующим, поскольку результат измерения, в принципе, может быть получен за время Δt . Однако при отличии входных сигналов от синусоидальных данный алгоритм имеет низкую точность, которая будет повышаться по мере затухания апериодических составляющих в первичных токах КЗ.

В этой связи практическое применение рассматриваемого алгоритма обуславливает необходимость цифровой фильтрации подводимых напряжений и токов, что ухудшает его динамические свойства.

Второй из рассматриваемых алгоритмов малочувствителен к искажениям форм напряжений и тока, возникающим при КЗ на линии. С теоретических позиций, является достаточно быстродействующим. Вместе с тем имеет невысокую точность и может давать неправильные результаты при наличии дуги в месте КЗ. Алгоритм, основанный на модели линии, отличается подверженностью влиянию помех. Практическая его реализация требует осуществления цифровой фильтрации входных сигналов, которая отрицательно сказывается на динамических свойствах алгоритма.

В ИОС современных микропроцессорных защит линий для дистанционных измерений наиболее широко применяется третий из вышеуказанных алгоритмов, основанный на использовании ОС первых гармоник напряжения и тока [4].

Основная часть

В алгоритме с обработкой ортогональных составляющих входных сигналов выборки активной R_n и реактивной X_n компонент сопротивления петли КЗ в дискретные моменты времени t_n ($n=1, 2, 3, \dots, N$) определяются по выборкам синусных и косинусных ОС напряжения u_{sn} , u_{cn} и тока i_{sn} , i_{cn} с использованием известных выражений [2]:

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{u_{sn}i_{sn} + u_{cn}i_{cn}}{i_{sn}^2 + i_{cn}^2}, \\ X_n &= \frac{u_{sn}i_{cn} - u_{cn}i_{sn}}{i_{sn}^2 + i_{cn}^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Непосредственное вычисление R_n , X_n по (1) не вносит задержку в алгоритм дистанционных измерений. Однако этому предшествует формирование из входных сигналов составляющих взаимно ортогональных функций, которое обладает фильтрующими свойствами и замедляет получение достоверных значений R_n , X_n . Поэтому динамические свойства алгоритма дистанционных измерений на основе использования ОС входных сигналов определяются главным образом динамикой формирователей ортогональных составляющих напряжения и тока.

В настоящее время существует значительное разнообразие цифровых формирователей ОС сигналов в микропроцессорных защитах электроэнергетических объектов [4]. При этом наиболее широко в качестве указанных формирователей используются рекурсивные цифровые фильтры (ЦФ) Фурье и их модификации.

Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений R_n , X_n на основе ОС Фурье (в дальнейшем алгоритм Фурье) могут быть улучшены в части как быстродействия, так и погрешности измерений в переходных режимах. Это может быть достигнуто за счет использования в указанном алгоритме разработанных формирователей ОС с коррекцией динамических погрешностей. Принципы их выполнения подробно изложены в [5].

В предлагаемом алгоритме дистанционных измерений R_n , X_n сформированные ОС Фурье подвергаются дополнительной цифровой обработке в соответствии с описанными в [6] вычислительными процедурами, в результате чего выделяются итоговые выборки составляющих напряжения и тока, отличающиеся меньшими динамическими погрешностями по сравнению с исходными.

С целью повышения точности измерений из ряда рассчитанных по (1) значений R_n , X_n возможна реализация метода исправления ошибок (усреднения).

Для сравнительной оценки динамических свойств предлагаемого алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления можно использовать следующие показатели:

- быстродействие, оценивается отрезком времени от момента возникновения КЗ до вхождения измеряемой величины в область срабатывания. Если указанная область неизвестна, то показателем быстродействия может быть отрезок времени от момента возникновения КЗ до вхождения измеряемой величины в зону установившегося значения;

- динамическую погрешность. В качестве оценочного параметра для сравнительной оценки динамических свойств двух алгоритмов дистанционных измерений входного сопротивления возможно использование относительной разности их погрешностей в переходных режимах КЗ, определяемой как

$$\Delta Z_n = \frac{Z_{нпр} - Z_{нФ}}{Z_6}, \quad (2)$$

где $Z_{нпр}$, $Z_{нФ}$ – входные сопротивления, полученные соответственно по предлагаемому алгоритму и алгоритму Фурье; Z_6 – базисное значение, в качестве которого можно принять полное сопротивление линии.

Если $\Delta Z_n > 0$, то лучшими динамическими свойствами обладает алгоритм Фурье, в противном случае при $\Delta Z_n < 0$ лучшие динамические свойства имеет предлагаемый алгоритм дистанционных измерений.

При $\Delta Z_n = 0$ сравниваемые алгоритмы равноценны по динамическим свойствам либо имеет место установившийся режим;

- траекторию замеров входного сопротивления. Оценка траекторий замеров входного сопротивления производится визуально по положению конца вектора указанного сопротивления в осях R , X на экране дисплея или на бумажном носителе.

Исследование динамических свойств предложенного алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления выполнялось методом вычислительного эксперимента.

Моделирование. Структура модели для испытаний ИОС с использованием вышеназванных алгоритмов измерений сопротивления выполнена в системе динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [7]. Ее основу составляют модели энергосистемы, трансформаторов тока и напряжения, линии электропередачи, построение которых подробно рассмотрено в [8]. Модель ИОС реализована из библиотечных блоков Simulink [9, 10] на основании рассмотренной выше методики.

ИОС установлен на линии длиной $l = 20$ км с удельными сопротивлениями $R_y = 0,02$ Ом/км

и $X_y = 0,3$ Ом/км. В процессе испытаний моделируются КЗ в начале линии на расстоянии 0,5 км от места установки защиты (близкое КЗ) и в конце линии на расстоянии 19,5 км от места установки защиты (удаленное КЗ). Входные величины, подводимые к ИОС (междуфазное напряжение $\dot{U}_p = \dot{U}_{AB}$, разность фазных токов $\dot{I}_p = \dot{I}_A - \dot{I}_B$), позволяют фиксировать с минимальными погрешностями сопротивление Z_{AB} при КЗ ABC , AB , ABO [11, 12]. Характеристика срабатывания ИОС – окружность радиусом 0,75 Ом, проходящая через начало координат.

Результаты исследования

Оценка быстродействия. На рис. 1 представлены результаты сравнения двух ИОС: первого, реализованного по предлагаемому алгоритму с входным сопротивлением Z_{np} (кривая 1), и второго, реализованного по алгоритму Фурье с входным сопротивлением Z_{ϕ} (кривая 2). Для обоих ИОС уставка срабатывания (прямая 3) одинакова и составляет 0,75 Ом.

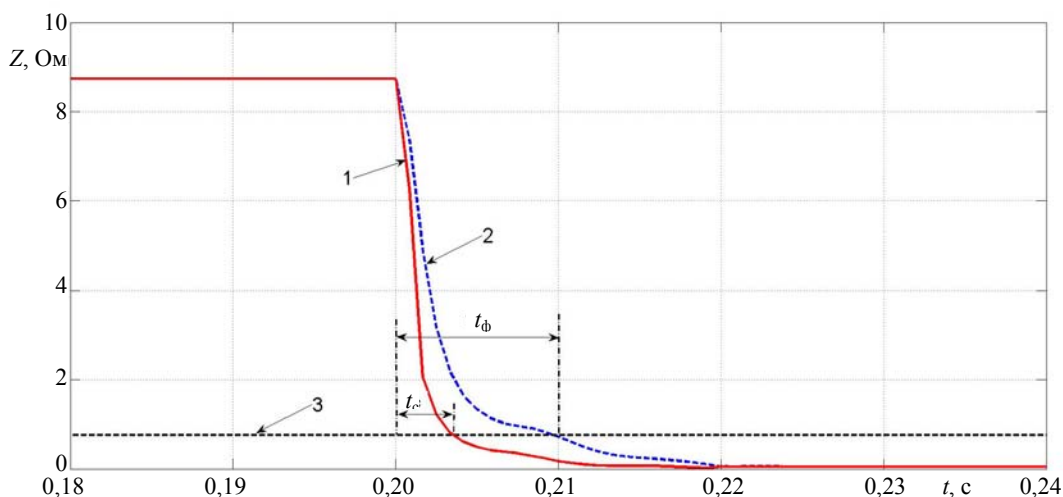


Рис. 1. Зависимости $Z = f(t)$ при близком междуфазном КЗ AB для ИОС с предлагаемым алгоритмом (кривая 1) и ИОС с алгоритмом Фурье (кривая 2); уставка срабатывания – прямая 3

Fig. 1. Dependences $Z = f(t)$ with a close phase-to-phase short circuit AB for a resistance measuring element with the proposed algorithm (curve 1) and a resistance measuring element with the Fourier algorithm (curve 2); trigger setting – straight 3

Двухфазное КЗ AB происходит в момент времени $t = 0,2$ с. Сопротивление предлагаемого ИОС $Z_{пр}$ достигает уровня срабатывания за $t_c = 0,004$ с от момента возникновения КЗ, а ИОС на основе алгоритма Фурье срабатывает за время $t_\phi = 0,01$ с, т. е. в 2,5 раза медленнее.

Рис. 2 позволяет по-другому интерпретировать временные зависимости рис. 1. Режим нагрузки – верхний угол рис. 2, при котором входные сопротивления обоих ИОС одинаковые и составляют порядка 9 Ом. В момент возникновения КЗ входное сопротивление $Z_{пр}$ ИОС с предлагаемым алгоритмом начинает изменяться быстрее, чем входное сопротивление Z_ϕ ИОС с алгоритмом Фурье. Это приводит к тому, что в осях $Z_{пр} - Z_\phi$ кривая 2 будет располагаться ниже прямой 3, соответствующей условию равенства сопротивлений $Z_{пр} = Z_\phi$ и представляющей идеальную траекторию движения входного сопротивления.

Оценка динамической погрешности. На рис. 3 приведены результаты моделирования относительной разности динамической погрешностей ΔZ по выражению (2) в переходных режи-

мах трехфазных КЗ – удаленного (кривая 1) и близкого (кривая 2). Как видно из рисунка, в обоих случаях КЗ $\Delta Z < 0$, что свидетельствует о лучших динамических свойствах ИОС с предлагаемым алгоритмом дистанционных измерений входного сопротивления.

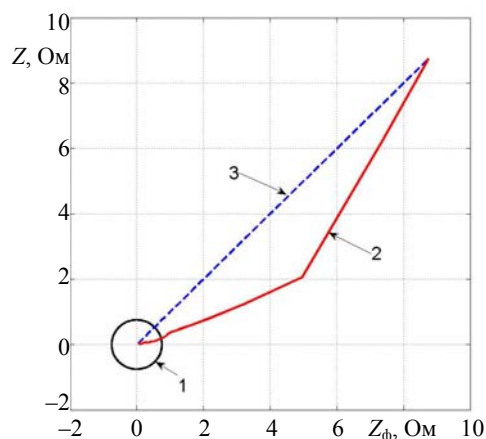


Рис. 2. Зависимость $Z_{пр} = f(Z_\phi)$ (кривая 2) при близком междуфазном КЗ AB для ИОС с предлагаемым алгоритмом измерений и алгоритмом Фурье; характеристика срабатывания – окружность 1; идеальная траектория – прямая 3

Fig. 2. Dependence $Z_{пр} = f(Z_\phi)$ (curve 2) with a close phase-to-phase short circuit AB for a resistance measuring element with the proposed measurement algorithm and Fourier algorithm; response characteristic – circle 1; ideal trajectory – straight 3

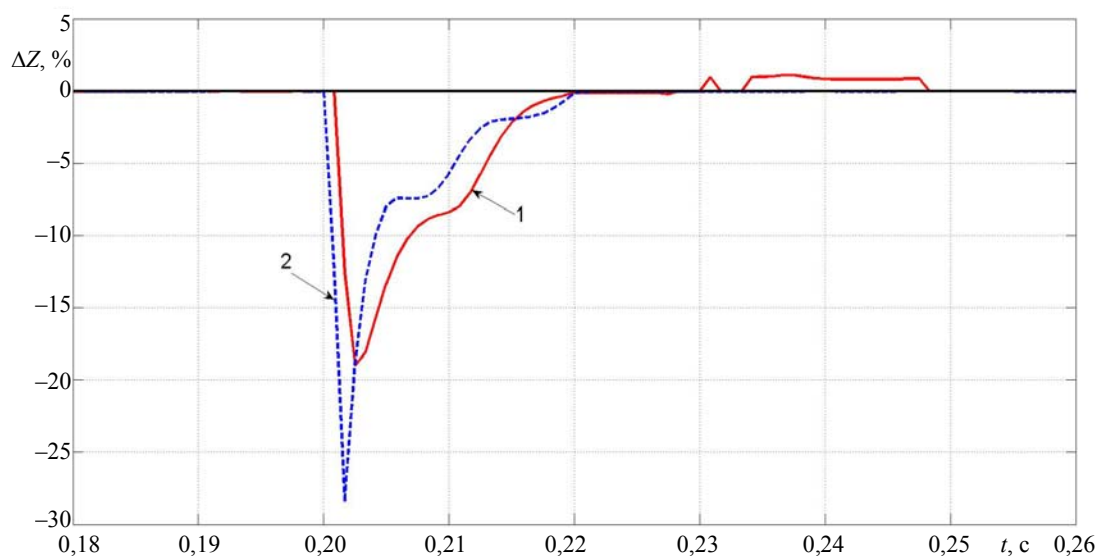


Рис. 3. Относительная разность динамических погрешностей при трехфазном удаленном КЗ (кривая 1) и трехфазном близком КЗ (кривая 2)

Fig. 3. Relative difference in dynamic errors for a three-phase remote short circuit (curve 1) and three-phase close short circuit (curve 2)

Выполненные методом вычислительного эксперимента многочисленные исследования, представленные вышеприведенными зависимостями для частных наиболее характерных режимов КЗ, свидетельствуют о более высоких динамических свойствах алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления на основе использования формирователей ОС сигналов с коррекцией динамических погрешностей в сравнении с аналогичным алгоритмом, в котором ОС токов и напряжений выделяются с помощью ЦФ Фурье.

При этом следует отметить, что режим электрической системы оказывает влияние на динамические свойства ИОС. Это обусловлено тем, что при КЗ и коммутациях возникают переходные процессы как в самой системе, так и в цепях ИОС. В этой связи представляет интерес оценка влияния переходного сопротивления в месте КЗ на динамические свойства предложенного алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления.

На рис. 4 представлены результаты сравнения быстродействия ИОС с предложенным алгоритмом дистанционных измерений сопротивления при трехфазных КЗ. Кривая 1 отражает изменение входного сопротивления при близком «металлическом» КЗ, кривая 2 – при КЗ через переходное сопротивление $R_{\text{п}} = 4$ Ом.

Для обоих режимов КЗ уставку срабатывания ИОС (прямая 3) составляет 0,75 Ом.

В обоих случаях КЗ происходит в момент времени $t = 0,2$ с. При «металлическом» КЗ сопротивление Z достигает уровня срабатывания за $t_{\text{с}} = 0,004$ с от момента возникновения КЗ, а при КЗ через переходное сопротивление – за $t_{\text{сп}} = 0,008$ с, т. е. в два раза медленнее.

Проведенные вычислительные эксперименты с другими значениями переходного сопротивления в различных режимах КЗ показывают, что наличие указанного сопротивления в месте повреждения ухудшает быстродействие алгоритма дистанционных измерений, степень которого возрастает с увеличением $R_{\text{п}}$.

Оценка влияния переходного сопротивления на динамическую погрешность предложенного алгоритма дистанционных измерений выполнялась с использованием в качестве оценочного параметра относительной разности погрешностей определения входного сопротивления в переходных режимах «металлических» КЗ и КЗ через $R_{\text{п}}$ с помощью выражения, аналогичного (2).

В результате выполненных исследований выявлено, что переходное сопротивление в месте КЗ не влияет на время существования динамической погрешности и не приводит к значительным изменениям ее уровня.

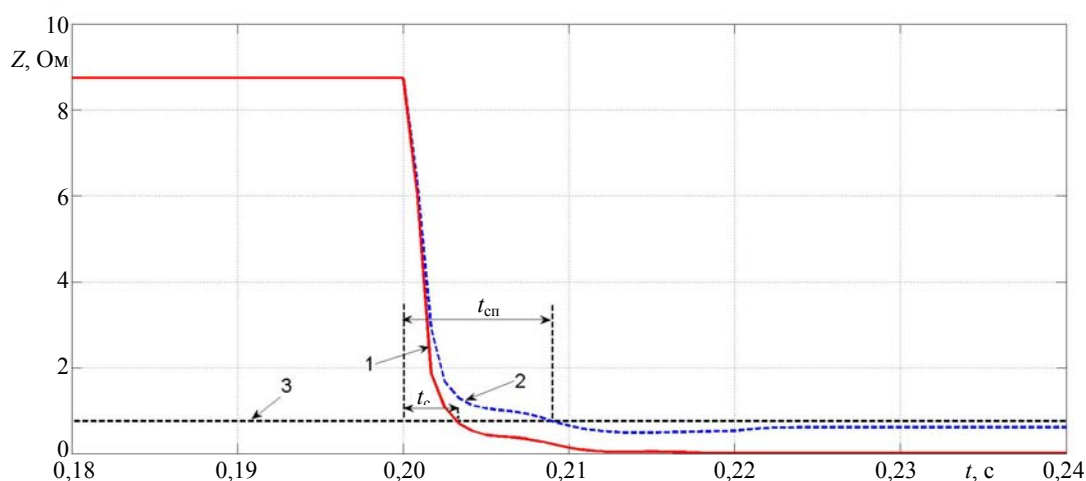


Рис. 4. Зависимости $Z = f(t)$ при близком трехфазном «металлическом» КЗ (кривая 1) и близком трехфазном КЗ через переходное сопротивление $R_{\text{п}} = 4$ Ом (кривая 2); уставку срабатывания – прямая 3

Fig 4. Dependences $Z = f(t)$ for a close three-phase “metal” short circuit (curve 1) and close three-phase short circuit through the contact resistance $R_{\text{п}} = 4$ Ohm (curve 2); response setting – straight 3

ВЫВОДЫ

1. Разработанный алгоритм дистанционных измерений на основе ортогональных составляющих тока и напряжения с коррекцией динамической погрешности обеспечивает достоверное определение входного сопротивления в нормальном режиме и при всех видах междоузельных коротких замыканий.

2. Предложенный алгоритм позволяет изменять входное сопротивление за время менее периода промышленной частоты, а его быстродействие в 1,4–1,6 раза выше, чем у аналогичного алгоритма на основе ортогональных составляющих Фурье.

3. Динамическая погрешность определения входного сопротивления в переходных режимах коротких замыканий в разработанном алгоритме, за редким исключением, существенно меньше, чем в алгоритме Фурье.

4. Предложенный алгоритм дистанционных измерений входного сопротивления в сравнении с аналогичным алгоритмом Фурье в целом имеет более высокие динамические свойства и может использоваться в измерительных органах микропроцессорных защит линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
3. Новаш, В. И. Частотные свойства алгоритмов функционирования измерительных органов сопротивления цифровых дистанционных защит ЛЭП / В. И. Новаш, В. В. Шмыгин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2004. № 5. С. 15–23.
4. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Г. Циглер; пер. с англ. под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Энергоиздат. 2005. 322 с.
5. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>.
6. Романюк, Ф. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в цифровых измерительных органах защит с коррекцией динамической погрешности / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 4. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300>.
7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
8. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
9. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
10. Дьяконов, В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2011. 975 с.
11. Фабрикант, В. Л. Дистанционная защита / В. Л. Фабрикант. М.: Высш. шк., 1978. 215 с.
12. Атабеков, Г. П. Релейная защита высоковольтных сетей / Г. П. Атабеков. М.; Л.: ГЭИ, 1949. 424 с.

Поступила 30.06.2023

Подписана в печать 31.08.2023

Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electrical Power Systems. Relay Network Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
3. Novash V. I., Shmyhin V. V. (2004) Frequency Characteristics of Resistance Metering Units Operating Algorithms in Overhead Lines Digital Distance Protection Devices. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 15–23 (in Russian).
4. Tsigler G. (2000) *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. Wiley-VCH. 310.
5. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417> (in Russian).
6. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2022) Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Digital Measuring Protection Elements with Correction of Dynamic Errors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300> (in Russian).
7. Tchernykh I. V. (2011) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMC-Press Publ.; Saint Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
8. Novash I. V., Romanyuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protection: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, Belarusian National Technical University. 168 (in Russian).
9. Dabney J., Harman T. (2003) *Simulink 4. Secrets of Mastery*. Moscow, BINOM – Laboratoriya Znaniy Publ. 403 (in Russian).
10. Dyakonov V. P. (2011) *MATLAB and Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMC-Press Publ. 975 (in Russian).
11. Fabrikant V. L. (1978) *Distance Protection*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 215 (in Russian).
12. Atabekov G. P. (1949) *Relay Protection of High-Voltage Networks*. Moscow; Leningrad, State Publishing House of Literature on Energy. 424 (in Russian).

Received: 30.06.2023

Accepted: 31.08.2023

Published online: 29.09.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427>

УДК 620.97

О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь

Часть 1

Состояние использования местных видов топлива в системах теплоснабжения

Докт. техн. наук, проф. В. А. Седнин¹⁾, асп. Р. С. Игнатович¹⁾, И. Л. Иокова¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В рамках обеспечения энергетической безопасности страны и проведения политики декарбонизации экономики в Республике Беларусь предполагается максимальное использование собственных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Однако открытым остается вопрос выбора вида теплоисточника в системах централизованного теплоснабжения при использовании местных видов топлива (МВТ). Ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС и относительно высокая удельная стоимость электрогенерирующих мощностей на МВТ склоняет чашу весов к применению в качестве теплоисточников котельных. Однако мировой опыт развития и применения теплофикации, как наиболее энергоэффективного решения в области теплоснабжения, требует более тщательного исследования данной проблемы. В статье представлен обзор по применению МВТ в Беларуси и ряде европейских стран с развитым централизованным теплоснабжением, а также на основе анализа данных открытых источников представлена информация по состоянию применения МВТ в системах централизованного теплоснабжения Республики Беларусь и ряда европейских стран, имеющих опыт в широком использовании твердой биомассы и где она составляет существенную долю в структуре выработки тепловой и электрической энергии по отношению к другим ТЭР. Приведены основные аспекты энергетических программ ряда европейских стран с наибольшей долей выработки тепловой и электрической энергии на МВТ. Выявлено, что наибольший интерес для Беларуси представляет энергетическая программа Финляндии, где доля атомной энергии в структуре выработки электрической энергии так же, как и в Республике Беларусь, приближается к 40 % и энергетическая стратегия предполагает увеличение доли ТЭЦ на МВТ в структуре выработки тепловой и электрической энергии.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, возобновляемые источники энергии, декарбонизация, местные виды топлива, мини-ТЭЦ, топливно-энергетические ресурсы, энергетическая система, эффективность

Для цитирования: Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 1: Состояние использования местных видов топлива в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427>

On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus

Part 1

State of Use of Local Fuels in Heat Supply Systems

V. A. Sednin¹⁾, R. S. Ignatovich¹⁾, I. L. Iokova¹⁾

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

Abstract. As part of ensuring the country's energy security and pursuing a policy of decarbonization of the economy in the Republic of Belarus, the maximum use of its own fuel and energy resources (FER) is expected. However, the question

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
sednin@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
sednin@bntu.by

of choosing the type of heat source in centralized heat supply systems when using local fuels (LF) remains open. The commissioning of the Belarusian Nuclear Power Plant and the relatively high specific cost of electricity generating capacities using local fuels tip the scales to the use of boiler houses as heat sources. However, world experience in the development and application of heating, as the most energy-efficient solution in the field of heat supply, requires a more thorough study of this problem. The paper presents an overview of the use of local fuels in Belarus and a number of European countries with developed centralized heat supply. Based on the analysis of open source data, the paper provides information on the state of use of local fuels in district heating systems of the Republic of Belarus and a number of European countries that have experience in the widespread use of solid biomass and where it constitutes a significant share in the structure of thermal and electrical energy production in relation to other fuel and energy resources. The main aspects of the energy programs of a number of European countries with the largest share of thermal and electrical energy generation using local fuels are presented. It has been revealed that the energy program of Finland is of the greatest interest for Belarus, where the share of nuclear energy in the structure of electrical energy production, just like in the Republic of Belarus, is approaching to 40 % and the energy strategy assumes an increase in the share of thermal power plants using local fuels in the structure of heat and electricity generation.

Keywords: energy security, renewable energy sources, decarbonization, local fuels, mini-thermal power plants, fuel and energy resources, energy system, efficiency

For citation: Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 1: State of Use of Local Fuels in Heat Supply Systems. *Science and Technique*. 22 (5), 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427> (in Russian)

Введение

Согласно утвержденной Советом Министров Республики Беларусь концепции энергетической безопасности от 23 декабря 2015 г. [1], в качестве первого принципа обеспечения энергетической безопасности страны определена максимальная реализация потенциала местных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а использование местных видов топлива (МВТ) отнесено к основным направлениям развития топливно-энергетического комплекса страны в долгосрочной перспективе. Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. [2] и «Программа комплексной модернизации производств энергетической сферы на 2021–2025 гг.» [3] предполагают увеличение к 2026 г. доли местных ТЭР в валовом потреблении ТЭР не менее чем на 16,1 % (без учета атомной энергии) и не менее 2,4 % в котельно-печном топливе на объектах организаций ГПО «Белэнерго». В качестве основного направления в вышеупомянутой государственной программе первым пунктом выделено создание энергоисточников, использующих местные ТЭР: древесное и торфяное топливо, горючие отходы и попутный газ.

Ввод в эксплуатацию второго блока атомной электростанции (АЭС) позволит сократить долю природного газа в энергобалансе Республики Беларусь до 60 % [4], однако для достижения целей энергетической безопасности к 2035 г. удельный вес природного газа необходимо снизить до 50 % [1]. Достигнуть требуемой диверсификации ТЭР в энергетическом балансе предполагается путем внедрения меро-

приятий по повышению энергетической эффективности газовых ТЭЦ и КЭС, перехода от паросиловых установок (ПСУ) к более эффективным парогазовым установкам (ПГУ), а также увеличения доли местных ТЭР и, в частности, МВТ в структуре энергетического баланса. Увеличение доли местных ТЭР также соответствует концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 г. [5], согласно которой при разработке систем теплоснабжения, удаленных от системы централизованного теплоснабжения населенных пунктов и районов, а также в сельской местности необходимо производить оценку целесообразности использования МВТ.

Также стоит отметить, что развитие энергоисточников на МВТ соответствует целям мирового сообщества по декарбонизации экономики и сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу. В условиях Республики Беларусь это важно в связи не только с присоединением в 2015 г. к Парижскому климатическому соглашению [6], но и с тем, что темпы роста среднегодовой температуры в нашей стране выше среднего и превышают прогнозируемые [7]. За последнее десятилетие в Республике Беларусь был проведен комплекс мероприятий по повышению вовлеченности МВТ в структуру ТЭР: произведено формирование наиболее эффективных систем машин для обработки, транспортировки и хранения биомассы, достигнут существенный прогресс в решении задач оптимизации расположения складов и логистики доставки топлива [8], что, помимо прочего, способствует решению вопроса занятости

населения в регионах с торфяными и лесозаготовительными предприятиями, а также увеличению сферы движения рубля внутри экономического пространства страны.

Следовательно, в Республике Беларусь существует необходимость и предполагается дальнейшее увеличение доли теплоисточников, работающих на МВТ, в то же время открытым, а следовательно, актуальным для исследований, остается вопрос эффективности строительства и эксплуатации минитеплоэлектростанций (мини-ТЭЦ), работающих на МВТ, с учетом профицита электрогенерирующих мощностей в объединенной энергосистеме страны.

Основная часть

К традиционным МВТ в нашей стране относятся древесина и торф, доля которых на сегодняшний день в структуре возобновляемых источников энергии (ВИЭ) составляет около 97 % [2]. В первую очередь, это обусловлено тем, что 40 % территории Республики Беларусь занимают леса [9], а по запасам торфа страна занимает одиннадцатое [10] и вто-

рое [11] места в мире и СНГ соответственно, а также первое место в мире по объемам добычи торфа [12]. Помимо больших запасов в нашей стране, отличительным преимуществом использования биомассы в качестве топлива является простота и дешевизна ее хранения.

Согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь за 2020 г. [13], собственное производство первичной энергии составляло только 17,1 %. Это позволяет говорить о том, что страна входит в двадцатку наиболее энергозависимых стран мира. В структуре производства первичной энергии из собственного топлива в 2020 г. 27 % занимала древесина, перерабатываемая в древесную щепу. Прочая биомасса составляла 15,7 %. На рис. 1 приведена структура выработки тепловой и электрической энергии в Республике Беларусь в зависимости от вида ТЭР за 2020 г. Как говорилось ранее, ввод в эксплуатацию двух блоков АЭС суммарной мощностью 2,4 ГВт значительно изменяет с 2023 г. структуру выработки первичной энергии за счет снижения доли природного газа и нефтепродуктов.

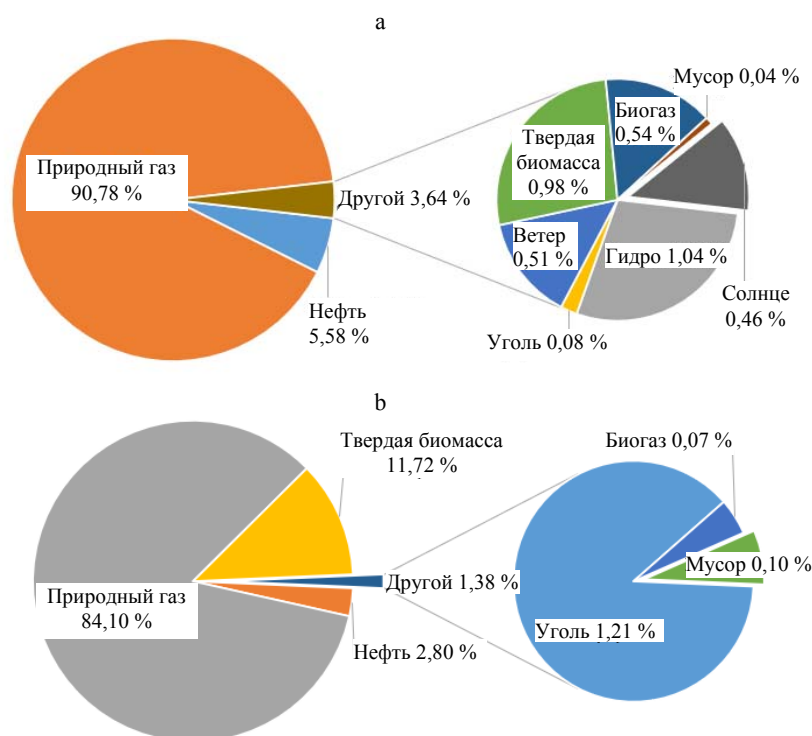


Рис. 1. Структура расходной части энергобаланса Республики Беларусь за 2020 г. по видам топлива при производстве энергии; а – электрической; б – тепловой

Fig. 1. Structure of the expenditure part of the energy balance of the Republic of Belarus for 2020 by fuel type in energy production; a – electrical; b – thermal

На рис. 2 приведены данные Международного энергетического агентства (МЭА) [14], показывающие трансформацию структуры производства тепловой и электрической энергии в Республике Беларусь по видам топлива в период с 1990 по 2020 г.

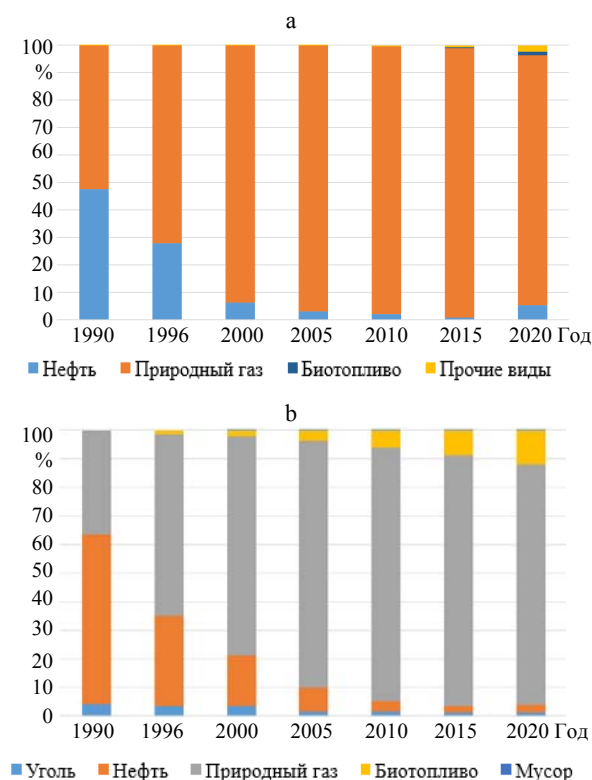


Рис. 2. Динамика структуры производства энергии в Республике Беларусь по видам топлива в период 1990–2020 гг.: а – электрической; б – тепловой

Fig. 2. Dynamics of energy production structure in the Republic of Belarus by fuel type in the period of 1990–2020: a – electrical; b – thermal

Следует отметить, что здесь и далее к биотопливу, помимо твердой биомассы из древесины и торфа, относятся биогаз и жидкое биотопливо. Согласно [2], по состоянию на 1 сентября 2020 г., суммарная электрическая мощность установок ВИЭ в Республике Беларусь составляла 491 МВт, из которых порядка 89 МВт вырабатывалось на 10 мини-ТЭЦ, использующих древесное топливо. Вместе с этим в отчете МЭА по энергетическому профилю Республики Беларусь [15] на декабрь 2018 г. показано, что всего в стране эксплуатировалось 22 мини-ТЭЦ, использующих местные ТЭР с установленной электри-

ческой мощностью 130 МВт и тепловой мощностью 345 МВт.

Из рис. 2 видно, что биотопливо в Республике Беларусь в основном используется для производства тепловой энергии. Для оценки целесообразности строительства в стране мини-ТЭЦ на МВт рассмотрим международный опыт. Для анализа выбраны государства, в которых либо имеются сопоставимые с Республикой Беларусь объемы твердой биомассы, либо она занимает значительную долю в структуре выработки тепловой и электрической энергии. Среди европейских стран площадь лесов, большую, чем в Беларуси, имеют Швеция и Финляндия [16], сопоставимые площади имеются в Германии, Украине, Польше и Норвегии, также интерес могут представлять Дания, Латвия, Эстония, Ирландия, Великобритания. На рис. 3 приведены тренды производства электрической и тепловой энергии из твердой биомассы для вышеперечисленных стран за период с 1990 по 2021 г. Статистическая информация, используемая при построении графиков, взята с сайта МЭА [14].

Анализируя данные, представленные на рис. 3, следует отметить рост выработки тепловой и электрической энергии из твердой биомассы за этот период, что, очевидно, требовало строительства новых генерирующих мощностей. При этом необходимо заметить, что доля выработки электрической энергии из твердой биомассы в общем объеме генерации также увеличивалась во всех странах, за исключением локального снижения к уровню 2020 г. для Эстонии в 2021 г., связанного с 40%-м ростом генерации из угля. Доля выработки электрической энергии из твердой биомассы в Эстонии за 2020 г. приблизилась к 30 %, в Дании за 2021 г. – к 22 %, в Финляндии – к 20 %, в Латвии – к 10 %. В свою очередь, доля выработки тепловой энергии из твердой биомассы за 2021 г. составила: в Эстонии – 67 %, в Латвии – 54, в Дании – 51, в Швеции – 46, в Финляндии – 44 %.

В контексте оценки целесообразности использования существующих и строительства новых комбинированных мини-ТЭЦ, использующих МВт, в Беларуси обратим внимание на страны, в которых наиболее высокая доля выработки из твердой биомассы как тепловой, так и электрической энергии: Эстонии, Финляндии, Дании.

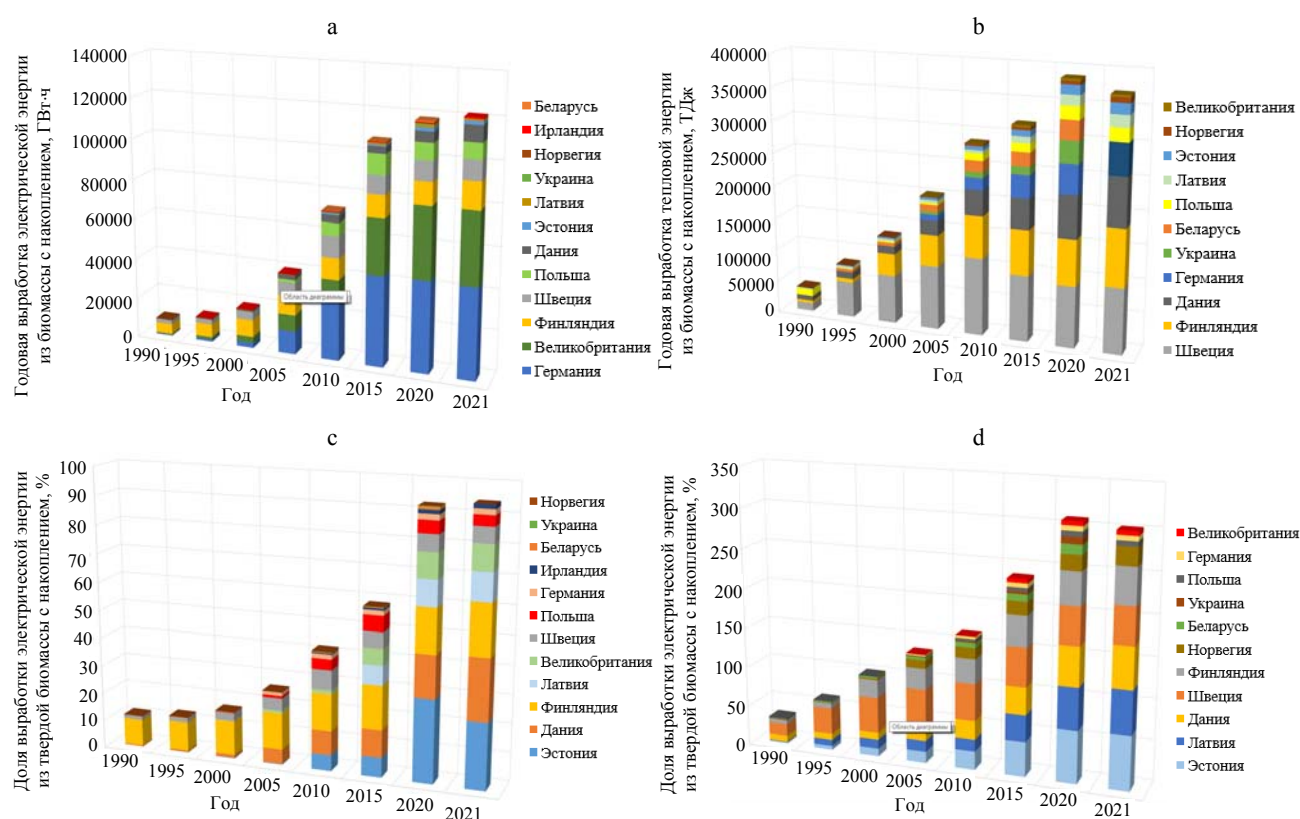


Рис. 3. Генерация энергии из твердой биомассы в ряде стран Европы в 1990–2021 гг.: а, б – трафики генерации из твердой биомассы соответственно электрической (ГВт·ч) и тепловой энергии (ТДж); с, д – трафики доли генерации из твердой биомассы в общем объеме производства соответственно электрической и тепловой энергии

Fig. 3. Energy generation from solid biomass in a number of European Countries in 1990–2021: а, б – generation traffic from solid biomass, respectively, of electrical (GW·h) and thermal energy (TJ); с, д – generation share traffic from solid biomass in the total production of electrical and thermal energy, respectively

В Эстонии на сегодняшний день ТЭЦ на биомассе играют важную роль в энергетической системе. На рис. 4 отражена динамика изменения структуры производства электрической и тепловой энергии в этой стране по различным видам топлива в 1990–2021 гг. Согласно национальной энергетической и климатической стратегии Эстонии в период до 2030 г. [17], для достижения целей по энергетической безопасности путем сохранения как можно более низкой степени зависимости от импортных энергоносителей предполагается максимальное использование потенциала МВТ.

Обозначенная стратегия предполагает строительство в 2020–2030 гг. новых комбинированных энергоисточников, не использующих ископаемое топливо, электрической мощностью порядка 25 МВт. Согласно государственному плану развития энергетической политики Эстонии [18] в 2030 г., 11 ТВт·ч от общей потребности в теплоте будет удовлетворяться за счет биомассы. При этом в качестве наиболее

важного вида топлива отмечается торф. По данным отчета МЭА по Эстонии [19], в 2017 г. 53 % всей биомассы для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии использовалось на ТЭЦ, 44 и 3 % соответственно – для производства только тепловой и только электрической энергии.

В [20] отмечается, что на сегодняшний день основные комбинированные энергоисточники на МВТ построены рядом с крупными потребителями тепловой энергии, однако указывается на значительный потенциал строительства мини-ТЭЦ на МВТ возле небольших населенных пунктов или в отраслях со стабильным потреблением теплоты, таким как целлюлозная и деревообрабатывающая промышленность. При этом отмечается, что основным сдерживающим фактором для использования мини-ТЭЦ являются их экономическая эффективность и, в частности, высокие капитальные затраты при их строительстве. Дополнительная мера стимулирования строительства новых ТЭЦ – отсут-

ствие необходимости выплат за выбросы CO₂, которые, как ожидается, в Европе будут непрерывно расти.

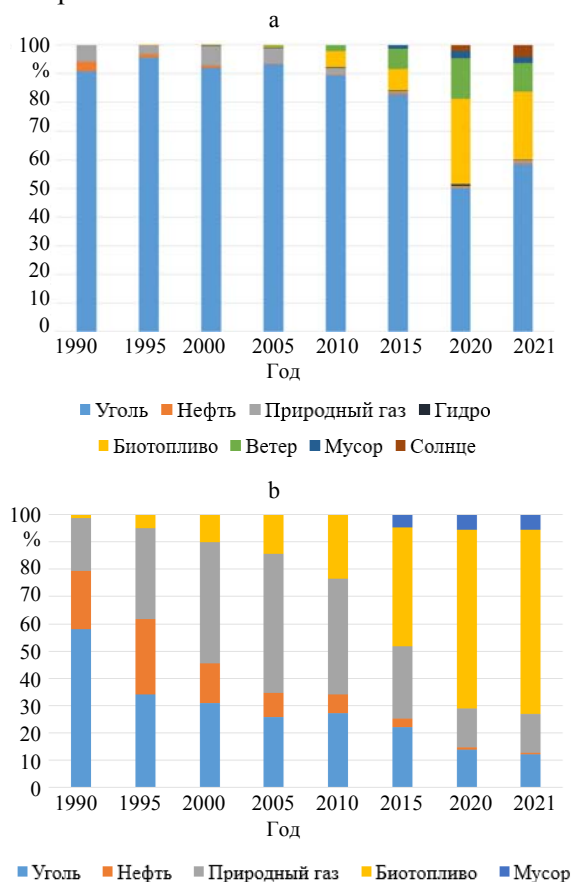


Рис. 4. Изменение структуры производства энергии в Эстонии по видам топлива в 1990–2021 гг.: а – электрической; б – тепловой

Fig. 4. Changes in the structure of energy production in Estonia by fuel type in the period of 1990–2021: a – electrical; b – thermal

Как говорилось ранее, комбинированная выработка тепловой и электрической энергии является наиболее эффективным способом получения энергии. Однако, как отмечается в [19], это создает некоторые сложности, так как предполагается работа на двух отдельно регулируемых рынках, а ТЭЦ в Эстонии предназначены, в первую очередь, для выработки тепловой энергии для систем централизованного теплоснабжения. Таким образом, традиционное при стимулировании использования возобновляемых источников энергии повышение тарифов на «зеленую» электрическую энергию в случае с ТЭЦ на биомассе может оказаться недостаточным. Один из возможных вариантов решения обозначенной проблемы заключается в интеграции в схему ТЭЦ аккумуляторов теплоты, что на примере Эстонии рассмотрено в работе [21].

Таким образом, можно сделать вывод, что Эстония стремится к сохранению высокой доли выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, использующих МВТ, при этом проблемы, связанные с дороговизной таких энергоисточников, решаются путем дополнительного стимулирования инвестиций.

Финляндия декларирует амбициозные планы в части декарбонизации своей энергетической системы, а именно достижение полной углеродной нейтральности к 2035 г. [22]. На рис. 5 отражена динамика изменения структуры производства тепловой и электрической энергии в данном государстве по видам топлива в период 1990–2021 гг.

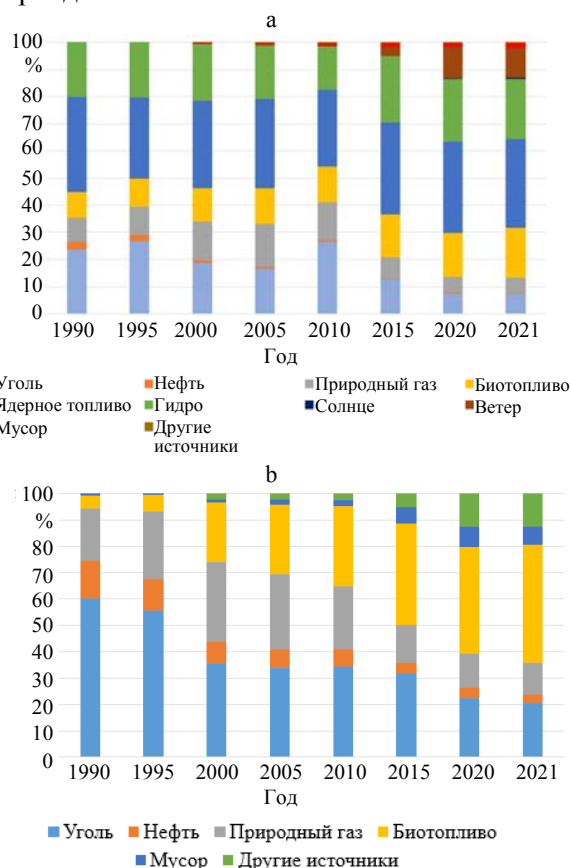


Рис. 5. Изменение структуры производства энергии в Финляндии по видам топлива в 1990–2021 гг.: а – электрической; б – тепловой

Fig. 5. Changes in the structure of energy production in Finland by fuel type in the period of 1990–2021: a – electrical; b – thermal

Из графиков очевидно, что основу энергетической системы страны на сегодняшний день составляют ядерная и возобновляемая энергетика. К последней, в первую очередь, относятся твердая биомасса, а также энергия ветра и гидроэнергетика.

Согласно отчету МЭА по энергетическому профилю Финляндии [23], в 2021 г. 27 % всей электрической и 60 % тепловой энергии для системы централизованного отопления этой страны вырабатывалось на ТЭЦ. При этом 29 % ТЭЦ страны работают на древесине, а 15 % – на торфе. Вместе с этим страна к 2029 г. планирует полностью отказаться от использования в своем энергетическом балансе угля, заменив его на древесную биомассу. В отчете неоднократно отмечается, что древесная биомасса в ближайшие годы будет играть важнейшую роль в достижении поставленных правительством целей декарбонизации. Сегодня важную роль в энергетическом секторе Финляндии играет торф, который занимает 2,7 % от общего потребления ТЭР и 2,9 % – в структуре выработки электрической энергии. Однако к 2030 г. планируется сокращение его использования минимум на 50 % и замещение на древесную биомассу, что будет способствовать сокращению выбросов CO₂ и уменьшит экологическое воздействие при его добыче.

Таким образом, Финляндия до конца десятилетия будет наращивать выработку тепловой и электрической энергии из твердой биомассы, в том числе посредством новых и адаптированных после использования торфа и угля мини-ТЭЦ. В качестве ключевых вопросов в энергетической отрасли страны выделяются ее декарбонизация, а также вопрос повышения энергетической эффективности. В результате этого наиболее эффективная комбинированная выработка энергии из биомассы, в случае включения ее в общую энергетическую сеть и систему централизованного отопления, будет дополнительно стимулироваться государством. Однако в долгосрочной перспективе в 2035–2050 гг. в стране планируется переход на бестопливные ВИЭ, в частности на ветровую энергетику.

Широкое распространение ТЭЦ, использующих в качестве топлива твердую биомассу в целом и древесину в частности, нашло в Дании. В отчете МЭА по энергетическому профилю Дании [24], отмечается, что страна декларировала цели по достижению 100 % независимости от ископаемых видов топлива и 100 % по выработке электрической энергии из возобновляемых источников энергии к 2050 г. На рис. 6 отражена динамика изменения структуры производства тепловой и электрической энергии в Дании по видам топлива в 1990–2021 гг.

Анализируя данные графики, можно сделать вывод, что основу выработки электрической энергии страны составляет ВИЭ, такие как вет-

ровая энергетика и биотопливо, и их доля в структуре производства электрической энергии непрерывно растет. Выработка тепловой энергии производится в большей мере посредством увеличения доли генерации из твердой биомассы и мусора.

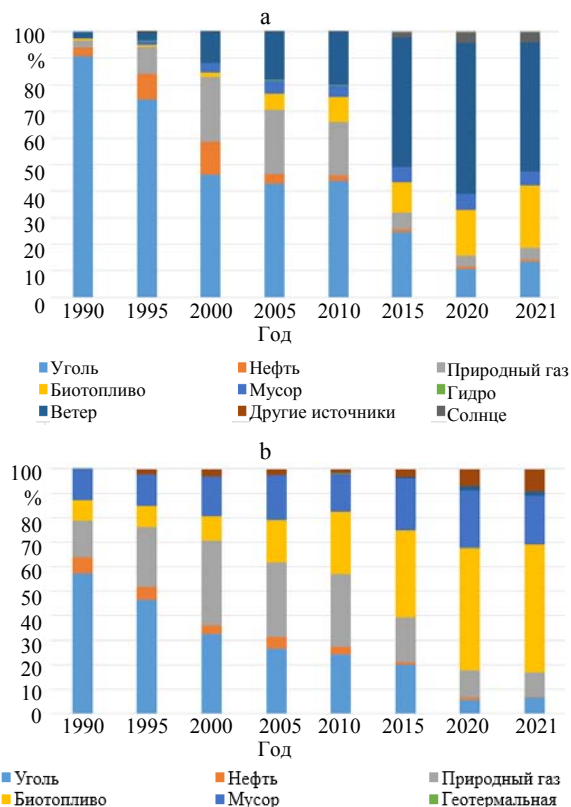


Рис. 6. Изменение структуры производства энергии в Дании по видам топлива в период 1990–2021 гг.: а – электрической; б – тепловой

Fig. 6. Changes in the structure of energy production in Denmark by fuel type in the period of 1990–2021: a – electrical; b – thermal

Согласно отчету энергетического агентства Дании за 2019 г. [25], как и Финляндия, Дания работает над переводом существующих ТЭЦ и КЭС, использующих в качестве топлива уголь, на твердую биомассу, в результате чего ее потребление в структуре ТЭР в краткосрочной перспективе будет расти. При этом для стимулирования сокращения угольной генерации предусмотрены дополнительные повышающие коэффициенты на покупку энергетической системой электрической энергии [26]. Согласно энергетической статистике за 2021 г., представленной энергетическим агентством Дании [27], 22 % электрической энергии и 33 % тепловой энергии страны вырабатывалось на ТЭЦ, использующих в качестве топлива биомассу. Всего в стране в 2021 г. работа-

ли 30 ТЭЦ на биомассе суммарной электрической мощностью 1836 МВт и суммарной тепловой мощностью 3362 МВт

В большинстве районов Дании, где функционируют системы централизованного теплоснабжения малой мощности, существующие нормативные правовые акты допускают новое строительство только комбинированных энергоисточников, которые, как предполагается, будут работать на биомассе [27]. Однако в соответствии с принятым в Дании в 2018 г. энергетическим соглашением, тарифы на продажу электрической энергии в энергосистему для новых комбинированных энергоисточников были снижены, а схема субсидирования их строительства заменена, в результате чего строительство нового производства электрической энергии из биомассы осуществляется только в том случае, если она сможет конкурировать с другими возобновляемыми технологиями [26, 27]. В отчете [27] отмечается также, что так как ТЭЦ на основе биомассы оцениваются как относительно дорогостоящие энергоисточники, а более половины используемой древесины импортируется из других стран, маловероятно что они смогут быть конкурентоспособными без дополнительной поддержки.

Таким образом, можно сделать вывод, что в краткосрочной перспективе в Дании ожидается рост использования биомассы на ТЭЦ в связи с отказом страны от угольной генерации при ее замещении на биомассу. Перспективы же строительства новой генерации на биотопливе в период до 2030 г. выглядят неоднозначными. В отчете МЭА [24] отмечается, что экономическая эффективность ТЭЦ на биомассе снижается с падением цены на электрическую энергию, так как предельные затраты на производство тепловой энергии при этом увеличиваются линейно. Целесообразность строительства новой генерации на биомассе будет зависеть от принятой в стране стратегии регулирования цен в секторе теплоснабжения. Однако и сокращения количества ТЭЦ на биомассе не ожидается ввиду сохранения для них субсидированных тарифов, а также возможности использования ТЭЦ для балансировки неравномерности выработки электрической энергии на ВИЭ, во многом вызванной непостоянством выработки ветровых электростанций.

Общим для энергосистем рассмотренных стран является то, что в условиях отсутствия значительных запасов нефти, природного газа, а также высокого потенциала для развития гидроэнергетики свое развитие в области тепло-

снабжения получила централизованная система теплоснабжения и теплофикация с генерацией энергии из твердой биомассы. В то же время рассмотренные страны отличаются своими возможностями по использованию солнечной и ветровой энергетики. Республика Беларусь из-за своего географического расположения не имеет значительного потенциала по использованию этих видов энергии. Следовательно, в рамках выбора возобновляемых видов энергии (солнечной, гидро-, ветровой, геотермальной и биомассы) наиболее перспективной является биомасса. И с этой точки зрения интересным для нас является опыт Финляндии, чья энергетическая стратегия подразумевает увеличение доли ТЭЦ на МВт. Во-первых, в данной стране доля ядерной энергии в структуре выработки электрической энергии в 2021 г. составляла 33 % и, как ожидается, вырастет до 40 % [23]. В Беларуси, как отмечалось ранее, планируется примерно такая же доля выработки электрической энергии на АЭС. Во-вторых, в Финляндии, так же как в Республике Беларусь, имеются большие запасы древесины, а также хорошо развитая деревообрабатывающая промышленность. Обе страны стремятся к сокращению доли природного газа в структуре ТЭР: Финляндия – для достижения поставленных целей по декарбонизации экономики, Республика Беларусь – в целях повышения энергетической безопасности и диверсификации структуры ТЭР.

ВЫВОДЫ

1. В статье на основе анализа открытых источников представлена информация по состоянию применения МВт в энергетике Республики Беларусь и ряда европейских стран, имеющих опыт в широком использовании твердой биомассы. Произведен краткий анализ структуры использования твердой биомассы как наиболее традиционного для Республики Беларусь МВт, а также для стран Европы, где ее запасы сопоставимыми с нашей страной либо где твердая биомасса составляет существенную долю в структуре выработки тепловой и электрической энергии по отношению к другим ТЭР. Показано, что ввиду стремления достижения в экономике Республики Беларуси требуемой диверсификации потребляемых топливно-энергетических ресурсов уделяется должное внимание расширению объемов использования местных видов топлива, что в целом соответствует государственной политике страны в рамках развития

энергетики до 2030 г., но МВТ в основном используются для производства тепловой энергии.

2. На основе анализа энергетических программ европейских стран с наибольшей долей выработки тепловой и электрической энергии из биотоплива выявлено, что наиболее близкой к Республике Беларусь является энергетическая программа Финляндии, где доля атомной энергии в структуре выработки электрической энергии, так же как в Республике Беларусь, приближается к 40 %. Энергетическая стратегия данной страны предполагает увеличение доли ТЭЦ на МВТ в структуре выработки тепловой и электрической энергии. Установлено, что необходима более глубокая проработка вопроса целесообразности развития теплофикации в Республике Беларусь на МВТ, в том числе с учетом современных тенденций развития энергетики в рамках цифровизации и мультиэнергетических систем.

Данная работа частично выполнена в рамках совместного научного проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства инновационного развития Республики Узбекистан «БРФФИ–МИРРУ-2022» (Договор Т22УЗБ-052).

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении концепции энергетической безопасности Республики Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 дек. 2015 г., № 1084. // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2015. № 5/41477.
2. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 24 фев. 2021 г., № 103 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103>.
3. Программа комплексной модернизации производств энергетической сферы на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Министерства энергетики Респ. Беларусь, 05 апр. 2021 г. № 19. Режим доступа: <https://energodoc.by/js/pdfjs/web/viewer.html?file=/file/fulltext-view/8720.pdf>.
4. Виктор Каранкевич: «С вводом АЭС доля природного газа в энергобалансе Беларуси снизится до 60 %» [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Республики Беларусь. 2022. Режим доступа: https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-svvodom-aes-dolya-prirodnogo-gaza-v-energobalanse-belarusi-snizitsya-do-60-/?sphrase_id=52175. Дата доступа: 01.06.2023.
5. Об одобрении Концепции энергетического развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года [Электронный ресурс]: постановление Министерства энергетики Респ. Беларусь, 25 фев. 2020 г., № 7. Режим доступа: Консультант Плюс: Республика Беларусь. Минск, 2020.
6. Парижское климатическое соглашение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/>. Дата доступа: 10.06.2023.
7. Иванов, Д. Л. Экстремально высокие темпы роста температуры воздуха как характерная черта и особен-

- ность климата территории Беларуси в условиях глобального потепления / Д. Л. Иванов, Е. А. Ивашко // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках. Минск: БГУ, 2021. С. 329–332.
8. Войтов, И. В. Современное состояние и перспективы использования древесного топлива в Республике Беларусь / И. В. Войтов, А. В. Ледницкий // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апреля 2017. Минск: БГТУ, 2017. С. 9–14.
 9. Лесной фонд [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/>. Дата доступа: 18.05.2023.
 10. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. Минск: Беларус. навука, 2009. 328 с.
 11. Короткая, А. И. Проблемы рационального использования природных ресурсов в Республике Беларусь / А. И. Короткая, Т. А. Тимофеева // XXI век. Техносферная безопасность. 2018. Т. 3, № 2 (10). С. 52–60.
 12. Энергетика в цифрах [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/press/energetika-v-tsifrah/>. Дата доступа: 20.05.2023.
 13. Энергетический баланс Республики Беларусь: стат. сб. / Нац. стат. к-т Респ. Беларусь; редкол.: И. В. Медведева (предис.) [и др]. Минск, 2021. 147 с.
 14. Energy Statistics Data Browser [Electronic Resource] // IEA. Mode of access: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>. Date of access: 20.06.2023.
 15. Belarus energy profile [Electronic Resource] // IEA. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/belarus-energy-profile>. Date of access: 20.05.2023.
 16. Федоренчик, А. С. Энергетическое использование низкокачественной древесины и древесных отходов / Монография / А. С. Федоренчик, А. В. Ледницкий. Минск: БГТУ, 2010. 446 с.
 17. Estonia's 2030 National Energy and Climate Plan (NECP 2030) [Electronic Resource]. Mode of access: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/ee_final_necp_main_en.pdf. Date of access: 04.07.2023.
 18. Energy Sector Development Plan [Electronic Resource]. 2023. Mode of access: <https://www.mkm.ee/en/energy-sector-and-mineral-resources/energy-economy/energy-sector-development-plan>. Date of access: 04.07.2023.
 19. Energy Policies of IEA Countries: Estonia 2019 Review [Electronic Resource]. Mode of access: https://iea.blob.core.windows.net/assets/21965e0d-c9a9-4617-b1ad-5b4539d91ad7/Estonia_2019_Review.pdf. Date of access: 04.07.2023.
 20. National Development Plan of the Energy Sector Until 2030 [Electronic Resource]. Tallinn, 2017. Mode of access: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/est199996.pdf>. Date of access: 04.07.2023.
 21. Volkova, A. Heat Storage Combined with Biomass CHP under the National Support Policy a Case Study of Estonia / A. Volkova, E. Latosov, A. Siirde // Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti. 2020. T. 24. № 1. С. 171–184.
 22. Carbon neutral Finland 2035 – National Climate and Energy Strategy [Electronic Resource] / Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland. Helsinki, 2022. Mode of access: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164323/TEM_2022_55.pdf. Date of access: 07.07.2023.
 23. IEA. Finland 2023. Energy Policy Review [Electronic Resource]. Mode of access: https://iea.blob.core.windows.net/assets/c77be693-2bb3-486c-8fbc-e33b0624bc7a/Finland_2023-EnergyPolicyReview.pdf. Date of access: 07.07.2023.
 24. IEA. Energy Policies of IEA Countries: Denmark 2017 Review [Electronic Resource]. Mode of access:

<https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/energypoliciesofieacountriesdenmark2017review.pdf> Date of access: 09.07.2023.

25. Denmark's Energy and Climate Outlook [Electronic Resource]. Mode of access: <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/deco19.pdf>. Date of access: 10.07.2023.
 26. Biomass Analysis [Electronic Resource]. 2020. Mode of access: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Bioenergi/biomasseanalyse_final_ren_eng.pdf. Date of access: 10.07.2023.
 27. Data, Tables, Statistics and Maps. Energy Statistics 2021 [Electronic Resource]. Mode of access: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/energy_statistics_2021.pdf. Date of access: 10.07.2023.
- Поступила 20.06.2023
Подписана в печать 25.08.2023
Опубликована онлайн 29.09.2023
- ## REFERENCES
1. On Approval of the Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, December 23, 2015, No 1084. *National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus*, 2015, No. 5/41477 (in Russian).
 2. About the State Program "Energy Saving" for 2021–2025: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, February 24, 2021, No. 103. *National legal Internet portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103> (in Russian).
 3. *Program for the Comprehensive Modernization of Energy Sector Production for 2021–2025*: Resolution of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus, April 05, 2021, No 19, 2021. Available at: <https://energodoc.by/js/pdfjs/web/viewer.html?file=/file/fulltext-view/8720.pdf>.
 4. Viktor Karankevich: "With the commissioning of the Nuclear Power Plant the Share of Natural Gas in the Energy Balance of Belarus will Decrease to 60 %". *Ministry of Energy of the Republic of Belarus*. Available at: https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-svvodom-aes-dolya-prirodnogo-gaza-v-energobalanse-belarusi-snizitsya-do-60-/?sphrase_id=52175 (accessed 01 June 2023) (in Russian).
 5. On Approval of the Concept of Energy Development of Electricity Generating Capacities and Electrical Networks for the Period Until 2030: Resolution of the Ministry of Energy, February 25, 2020, No. 7. *Consultant Plus: Republic of Belarus*, 2020 (in Russian).
 6. *Paris Climate Agreement*. Available at: <https://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/> (accessed 10 June 2023) (in Russian).
 7. Ivanov D. L., Ivashko E. A. (2021) Extremely High Growth Rates of air Temperature as a Characteristic Feature and Peculiarity of the Climate of the Territory of Belarus in the Context of Global Warming. *Razvitie Geograficheskikh Issledovaniy v Belarusi v XX–XXI Vekakh* [Development of Geographical Research in Belarus in the 20th–21st Centuries]. Minsk, Belarusian State University, 329–332 (in Russian).
 8. Voytov I. V., Lednitsky A. V. (2017) Current State and Prospects for the Use of Wood Fuel in the Republic of Belarus. *Lesozagotovitel'noe Proizvodstvo: Problemy i Resheniya: Materialy Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 26–28 aprelya 2017* [Logging Production: Problems and Solutions: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Minsk, April 26–28, 2017]. Minsk, Belarusian State Technological University, 9–14 (in Russian).
 9. *Forest Fund*. Available at: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/> (accessed 18 May 2023) (in Russian).
 10. Tomson A. E., Naumova G. V. (2009) *Peat and Products of its Processing*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 328 (in Russian).
 11. Korotkaya A. I., Timofeeva T. A. (2018) Problems of Rational use of Natural Resources in the Republic of Belarus. *XXI Vek. Tekhnosfermaya Bezopasnost' = Technosphere Safety*. XXI Century, 3 (2), 52–60 (in Russian).
 12. *Energy in Numbers. Ministry of Energy of the Republic of Belarus*. Available at: <https://minenergo.gov.by/press/energetika-v-tsifrakh/>. (accessed 20 May 2023) (in Russian).
 13. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2021) *Energy Balance of the Republic of Belarus: Statistical Collection*. Minsk. 147 (in Russian).
 14. *Energy Statistics Data Browser. IEA*. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser> (accessed 20 June 2023).
 15. *Belarus Energy Profile. IEA*. Available at: <https://www.iea.org/reports/belarus-energy-profile> (accessed 20 May 2023).
 16. Fedorenchik A. S., Lednitsky A. V. (2010) *Energy Use of Low-Quality Wood and Wood Waste*. Minsk, Belarusian State Technological University. 446 (in Russian).
 17. *Estonia's 2030 National Energy and Climate Plan (NECP 2030)* Available at: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/ee_final_necp_main_en.pdf (accessed 04 July 2023).
 18. *Energy Sector Development Plan. 2023*. Available at: <https://www.mkm.ee/en/energy-sector-and-mineral-resources/energy-economy/energy-sector-development-plan> (accessed 04 July 2023).
 19. *Energy Policies of IEA Countries: Estonia 2019 Review*. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/21965e0d-c9a9-4617-b1ad-5b4539d91ad7/Estonia_2019_Review.pdf (accessed 04 July 2023).
 20. *National Development Plan of the Energy Sector Until 2030*. Tallinn, 2017. Available at: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/est199996.pdf> (accessed 04 July 2023).
 21. Volkova A., Latosov E., Siirde A. (2020) Heat Storage Combined with Biomass CHP under the National Support Policy a Case Study of Estonia. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, 24 (1), 171–184.
 22. Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland. Helsinki (2022) *Carbon Neutral Finland 2035 – National Climate and Energy Strategy*. Available at: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164323/TEM_2022_55.pdf (accessed 07 July 2023).
 23. *IEA. Finland 2023. Energy Policy Review*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c77be693-2bb3-486c-8f8e-e33b0624bc7a/Finland2023-EnergyPolicyReview.pdf> (accessed 07 July 2023).
 24. *IEA. Energy Policies of IEA Countries: Denmark 2017 Review*. Available at: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/energypoliciesofieacountriesdenmark2017review.pdf> (accessed 10 July 2023).
 25. *Denmark's Energy and Climate Outlook*. Available at: <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/deco19.pdf> (accessed 10 July 2023).
 26. *Biomass Analysis*. 2020. Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Bioenergi/biomasseanalyse_final_ren_eng.pdf (accessed 10 July 2023).
 27. *Data, Tables, Statistics and Maps. Energy Statistics 2021*. Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/energy_statistics_2021.pdf (accessed 10 July 2023).

Received: 20.06.2023

Accepted: 25.08.2023

Published online: 29.09.2023

Static Characteristics of Magnetic Modulation DC Converters with Analog Filter

N. O. Ataulaev¹⁾, A. A. Dziaruhina²⁾, K. S. Murodov¹⁾

¹⁾Navoi State Mining and Technology University (Navoi city, Uzbekistan),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Abstract. The paper examines the most important requirements for current converters, the features of magnetic modulation converters, and identifies their fundamental and design features. The paper considers the principle of constructing converters for contactless DC measurement and their disadvantages of converters, methods of current measurement using magnetic modulation current converters, in which the magnetic permeability of a core made of ferromagnetic material is modulated. The influence of the parameters of the elements of a magnetic modulation current converter with an analog filter on their static characteristics and the influence of modulation on the static characteristics of the sensor have been determined. It has been revealed that the discrete operation of the magneto-modulation DC converter does not affect its static characteristics and the nonlinearity due to the type of modulation also does not affect the static characteristics of the sensor. The most important requirement for the operation of a magneto-modulation DC converter for autonomous power supplies with recharging buffer batteries is the formation of a static characteristic with the specified properties: linearity, sensitivity and the required range of operating currents. An analytical expression for the static characteristic is obtained in the form of the dependence of the output voltage on the values of T_1 and T_2 for the basic version of a magnetic modulation DC converter with an analog low-pass filter. Curves of the static characteristics of the magneto-modulation DC converter have been constructed for different values of the resistance of the ballast resistor R , as well as curves of the static characteristics of the magneto-modulation DC converter for different values of the supply voltage E . Analytical expressions for the static characteristics of a magneto-modulation DC converter based on magnetic transistor multivibrators with pulse-width modulation, curves of their characteristics and the output voltage of a magnetic modulation DC converter with a digital output and a discrete filter have been obtained.

Keywords: current converter, magnetic modulation sensor, direct current, non-contact measurement, magnetic permeability, analog filter

For citation: Ataulaev N. O., Dziaruhina A. A., Murodov K. S. (2023) Static Characteristics of Magnetic Modulation DC Converters with an Analog Filter. *Science and Technique*. 22 (5), 428–432. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-428-432>

Статические характеристики преобразователей постоянного тока с магнитной модуляцией с аналоговым фильтром

Доц. Н. О. Атауллаев¹⁾, канд. техн. наук, доц. Е. А. Дерюгина²⁾, докторант Х. Ш. Муродов¹⁾

¹⁾Навоийский государственный горный и технологический университет (Навои, Республика Узбекистан),

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

Реферат. В данной статье рассматриваются важнейшие требования к преобразователям тока, особенности магнито-модуляционных преобразователей и выявлены их принципиальные и конструктивные особенности. Рассмотрены принцип построения преобразователей для бесконтактного измерения постоянного тока и основные недостатки преобразователей, методы измерения тока с помощью магнитомодуляционных преобразователей тока, в которых модулируется магнитная проницаемость сердечника из ферромагнитного материала. Определено влияние параметров элементов магнитомодуляционного преобразователя тока с аналоговым фильтром на их статические характеристики и влияние модуляции на статические характеристики датчика. Выявлено, что дискретность работы магнитомодуляционного преобразователя постоянного тока не оказывает влияния на его статические характеристики и нели-

Адрес для переписки

Атауллаев Нодиржон Одилевич
Навоийский государственный горный и технологический университет
ул. Галаба Шох, 76Б,
210100, Навои, Республика Узбекистан
Тел. +998 79 223-23-32
info@ndki.uz

Address for correspondence

Ataulaev Nodirjon O.
Navoi state Mining and Technology University
76B, Galaba Shoh, st.
210100, Navoi, Republic of Uzbekistan
Tel.: +998 79 223-23-32
info@ndki.uz

нейность, обусловленную видом модуляции, а также не влияет на статические характеристики датчика. Важнейшим требованием к работе магнитомодуляционного преобразователя постоянного тока для автономных источников питания с подзарядом буферной аккумуляторной батареей является формирование статической характеристики с заданными свойствами: линейностью, чувствительностью и требуемым диапазоном рабочих токов. Получено аналитическое выражение статической характеристики в виде зависимости выходного напряжения от величины T_1 и T_2 для базового варианта магнитомодуляционного преобразователя постоянного тока с аналоговым фильтром нижних частот. Построены кривые статических характеристик магнитомодуляционного преобразователя постоянного тока при разных значениях сопротивления балластного резистора R , а также кривые статических характеристик магнитомодуляционного преобразователя постоянного тока при разных значениях напряжения питания E . Получены аналитические выражения статических характеристик магнитомодуляционного преобразователя постоянного тока на основе магнитно-транзисторных мультивибраторов с широтно-импульсной модуляцией, кривые их характеристик, выходное напряжение магнитомодуляционного преобразователя постоянного тока с цифровым выходом и с дискретным фильтром.

Ключевые слова: преобразователь тока, магнитомодуляционный датчик, постоянный ток, бесконтактное измерение, магнитная проницаемость, аналоговый фильтр

Для цитирования: Атауллаев, Н. О. Статические характеристики преобразователей постоянного тока с магнитной модуляцией с аналоговым фильтром / Н. О. Атауллаев, Е. А. Дерюгина, Х. Ш. Муродов // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 428–432. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-428-432>

Introduction

Magnetic modulation converters are named, the action of which is based on a change in the magnetic state of a ferromagnetic material with simultaneous magnetization in constant and alternating fields. Flux modulation is possible due to the non-linear properties of the magnetic circuit [1].

Currently, a large number of converters are known and this creates certain difficulties in choosing the required type, specific design of these converters [2]. In this regard, it is advisable to classify the converters, which will reveal their fundamental and design features.

The currently existing converters are divided into two large groups according to the way they are included in the measured circuit [3]:

1) contact transducers based on measuring the voltage drop across a resistor included in the circuit of the measured current;

2) non-contact transducers based on the measurement of the magnetic field created by the measured current.

Converters of the first group contain, as a rule, a certain set of elements – a shunt, a modulator, a transformer, a demodulator, a low-pass filter, in a large number of variants of such converters [4]. These elements are only supplemented by new ones that contribute to some improvement in their characteristics. Therefore, it would be expedient to select transducers of the second group only.

Two principles of construction of converters for non-contact measurement of direct current are possible. One of them consists in the implementation of the first Maxwell equation with the determination of the differential and integral parameters of the magnetic field [5].

Another principle is to implement the third Maxwell equation, which establishes a relationship between the electric induction vector and the

charge density, which is related to the measured current. The disadvantage of this method is that in this case it is necessary to take into account the speed of the charge carriers that form the current.

In our case, it is not necessary to determine the integral or differential parameters of the field created by the measured current. Since the current-carrying conductor is motionless, has a constant cross section which is including current density distribution, and enough to measure at any point in space the values of the magnetic field strength H , induction B or electric field strength E , unambiguously associated with the measured current. The simplest magnetometric transducer here will be a freely rotating magnetic needle [6].

Of all the above transducers, transducers with a shunt and an M-DM channel have the most acceptable characteristics [7]. In the simplest case, such a converter consists of a shunt, a modulator that converts a DC signal into an AC signal, an isolation transformer, a demodulator (detector), and low-pass filters.

Materials and methods

The main disadvantage of such converters is the rather high power dissipated in the shunt.

The most promising method for measuring the parameters of a magnetic field is the induction method based on the use of the law of electromagnetic induction [8]:

$$e_{\Sigma} = e_{tr} + e_{mov} = - \left(S \frac{dB}{dt} + \frac{dS}{dt} \right), \quad (1)$$

where e_{Σ} – total electromotive force; e_{tr} – transformer's electromotive force, the appearance of which is associated with a change in the magnetic field over time; e_{mov} – electromotive force of movement, resulting from a change in the effective

area of the contour; B – magnetic induction; S – effective contour area, m^2 .

Induction converters are divided into passive (current transformers) and active (magnetic modulation).

To measure the current, the most suitable are magnetic modulation current converters, in which the magnetic permeability of a core made of a ferromagnetic material is modulated [9]. They have the highest sensitivity and are the easiest to be implemented. Current transducers (CT) used in measuring areas are subject to various mechanical stresses, which significantly affects their reliability. Therefore, the use here of magnetic modulation DC converters that are insensitive to mechanical influences becomes the only possible one.

Magnetic modulation converters are widely used in computing technology as logic elements and memory devices. In measuring technology, MMCs are used to measure the strength of a constant magnetic field (ferroprobes), to convert direct current into alternating current with a decrease in the absolute value of the current (measuring direct current transformers), to convert direct current into alternating current with an increase in the absolute value of the current (magnetic amplifiers), to measure the movement of an object to which the moving part of the transducer with carries a permanent magnet, is connected (magnetic modulation transducers of displacement).

The most important requirement for a magnetic modulation current converter (Magnetic modulation converters) for signal systems is the formation of a static characteristic with desired properties: linearity, sensitivity and the required range of operating currents. These properties depend on the values of a number of parameters of the Magnetic modulation converters elements: the resistance values of the resistors in the MCC, the number of turns in the transformer windings, and other values.

In the process of developing an engineering methodology for calculating the parameters of Magnetic modulation converters elements, it is required to obtain analytical expressions for the dependences $U_{out} = f(I_x)$ for Magnetic modulation converters variants with a pulse-width modulator [10]. Using these expressions, it is necessary to determine the influence of the parameters of the magnetic modulation DC converter elements on their static characteristics.

When analyzing the static characteristics of Magnetic modulation converters with pulse-width modulator, it must be borne in mind that, firstly, the converter under consideration is a discrete link, i. e. the “current-pulse duration” transformation occurs in this case discretely with an interval T (where T is the period of self-oscillations), and secondly, it is a non-linear link, since it contains an element that has a non-linear characteristic – the magnetic circuit of the transformer.

It is known that with an infinitely small bandwidth of the continuous part in a discrete system, the influence of the discreteness of the system operation on the values of the output signal is minimal, i. e. the discrete system in this case is identical in its properties to the continuous one [11]. When analyzing the static characteristics of the Magnetic modulation converters, the bandwidth of the continuous part of the device is taken equal to zero, which, with an infinite observation time t , does not affect the value of the output signal. Therefore, the discreteness of the work of the converter under study in the analysis of its static characteristics in this case will not be taken into account, which will not lead to errors when calculating the dependence $U_{out} = f(I_x)$.

Since the discreteness of the MCC operation does not affect its static characteristics, the nonlinearity due to the type of modulation also does not affect the static characteristics of the sensor.

Thus, when analyzing the static characteristics of the Magnetic modulation converters with pulse-width modulation, we can assume that this converter is a continuous link with a nonlinear dependence $U_{out} = f(I_x)$. This non-linearity is mainly due to the non-linearity of the magnetization characteristics of the material of the magnetic core of the converter. The analysis of such links, as a rule, is carried out by compiling and solving a nonlinear differential equation that describes the operation of the sensor under study.

We obtain an analytical expression for the static characteristic in the form of a dependence of the output voltage on the values of T_1 and T_2 for the basic version of the Magnetic modulation converters with analog [12]. It is equal to the integral of the difference in voltage drops across the ballast resistors and is determined by the expression:

$$U_{out} = \frac{1}{T_1 + T_2} \left\{ \left[T_1 E_1 - RS_{\mu} W_k k_1 k_2' \int_{-I_2}^{I_2} \frac{dl_1}{1 + k_2'^2 I_1^2} \right] - \left[T_2 E_1 - RS_{\mu} W_k k_1 k_2' \int_{-I_2}^{I_2} \frac{dl_1}{1 + k_2'^2 I_1^2} \right] \right\} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{T_1 + T_2} \left\{ \left[T_1 E_1 - R \frac{S_{\mu} W_k}{k_1} \left(\operatorname{arctg} \frac{I_2'}{k_2'} + \operatorname{arctg} \frac{I_1'}{k_2'} \right) \right] - \left[T_2 E_1 - R \frac{S_{\mu} W_k}{\alpha_1} \left(\operatorname{arctg} \frac{I_1'}{k_2'} + \operatorname{arctg} \frac{I_2'}{k_2'} \right) \right] \right\} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} = \\
&= E_1 \frac{\left[\frac{k_2' U_{2x}}{R^2 + k_2'^2 U_{2x}^2} - \frac{k_2' U_{1x}}{R^2 + k_2'^2 U_{1x}^2} \right] \operatorname{arctg} \left[\frac{2k_2' I_{km}}{1 - k_2' I_1'} \right] + \left[\frac{R}{2[R^2 + k_2'^2 U_{1x}^2]} \ln \frac{U_{1k}^2 [1 + k_2'^2 I_2']}{U_{2k}^2 [1 + k_2'^2 I_2']} - \right. \\
&\quad \left. \left[\frac{k_2' U_{2x}}{R^2 + k_2'^2 U_{2x}^2} - \frac{k_2' U_{1x}}{R^2 + k_2'^2 U_{1x}^2} \right] \operatorname{arctg} \left[\frac{2k_2' I_{km}}{1 - k_2' I_1'} \right] + \left[\frac{R}{2[R^2 + k_2'^2 U_{1x}^2]} \ln \frac{U_{1k}^2 [1 + k_2'^2 I_2']}{U_{2k}^2 [1 + k_2'^2 I_2']} - \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{R}{2[R^2 + k_2'^2 U_{1x}^2]} \ln \frac{U_{1k}^2 [1 + k_2'^2 I_2']}{U_{2k}^2 [1 + k_2'^2 I_2']} \right] \right. \\
&\quad \left. - \frac{R}{2[R^2 + k_2'^2 U_{1x}^2]} \ln \frac{U_{1k}^2 [1 + k_2'^2 I_2']}{U_{2k}^2 [1 + k_2'^2 I_2']} \right] \rightarrow
\end{aligned} \quad (2)$$

Thus, from the last expression it can be seen that the output voltage for all variants of the Magnetic modulation converters with pulse-width modulation is proportional to the ratio $(T_1 - T_2)$ to $(T_1 + T_2)$, and T_1 and T_2 depend on the measured current I_x .

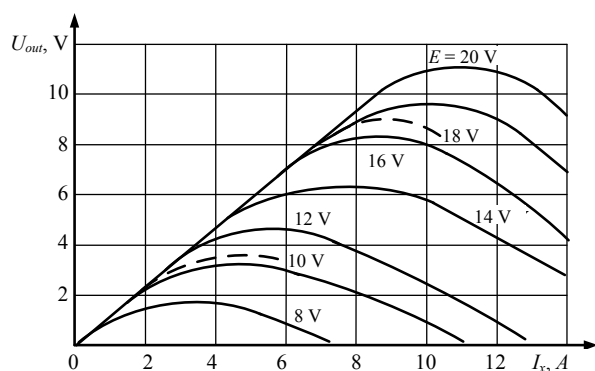


Fig. 1. Curves of static characteristics of MCC at different values of the supply voltage E . Solid curves are calculated, and dotted curves are experimental data

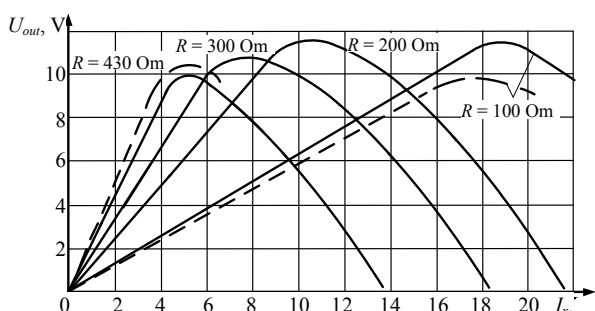


Fig. 2. Curves of static characteristics of MCCDC at different values of the resistance of the ballast resistor R . Solid curves are calculated, and dotted curves are experimental data

Results

An analysis of the obtained analytical expressions for the static characteristics of magnetic

modulation DC converter with pulse-width modulation and their curves, as well as a comparison of the results of calculation and experiment, allow us to draw the following conclusions:

1. The resulting analytical expressions for the conversion characteristic describe the static mode of operation of the MCC with sufficient accuracy.
2. The static response of the MCC with pulse-width modulation has a high linearity in the initial section.
3. The sensitivity of the MCC is determined to a greater extent by the value of the resistance of the ballast resistor R .

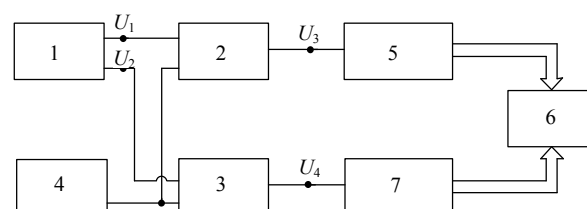


Fig. 3. Functional diagram of the MCC

Fig. 1 shows an Magnetic modulation converters circuit with a digital output that uses low pass filter instead of analog. Let us determine whether such a method of extracting a useful signal affects the shape of the static MCC characteristic. To do this, we will find the dependence $U_{out}(I_x)$.

Under the action of the current I_x , the duty cycle of the pulses generated by the magneto-transistor multivibrators changes. In this case, the amplitudes of positive and negative pulses on the output winding W_{out} change relative to its mid-point at constant volt-second areas.

When the current I_x changes, the values of U_1 and U_2 change, but their sum and the volt-second area of the pulses remain constant.

That's why:

$$\begin{cases} U_1 = U_2 = (E_1 - I_{ks}R) \frac{W_{out}}{W_k}; \\ U_1 T_1 = U_2 T_2, \end{cases} \quad (3)$$

where I_{ks} – is the transistor collector current value corresponding to the saturation induction B_s ; W_k , W_{out} – the number of turns, respectively, in the collector and output windings.

From equations (3) we find the values U_1 and U_2 :

$$\begin{cases} U_1 = \frac{2(E_1 - I_{ks}R)T_2}{T_1 + T_2} \frac{W_{out}}{W_k}; \\ U_1 = \frac{2(E_1 - I_{ks}R)T_1}{T_1 + T_2} \frac{W_{out}}{W_k}. \end{cases} \quad (4)$$

The output voltage of the MCC with digital output and discrete filter is equal to the voltage difference between U_1 and U_2 :

$$U_{out} = U_1 - U_2 = 2(E_1 - I_s R) \frac{W_{out}}{W_1} \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2}. \quad (5)$$

It can be seen from expression (1.4) that the shape of the characteristics $U_{out} = f(I_x)$ for the MCC with a discrete filter is similar to the shape of the dependencies $U_{out}(I_x)$ according to expressions (1) obtained for the MCC with an analog filter. The dependence according to expression (4) differs only in scale.

CONCLUSION

Thus, the analysis of the expression for the static characteristic of the MCC with a digital output and with a discrete filter shows that the discrete filter does not affect the shape of the static characteristic of the MCC.

An analysis of the static characteristics of the considered magnetic modulation converters on magnetic transistor multivibrators with pulse-width modulation has shown that they have a high linearity in the initial section, and the duration of the linear section of the characteristic depends on the quantities that mainly affect the maximum collector current (I_{MC}): the values of the power supply voltage (E), the resistance of the base resistor (R_b) and the number of turns of the base winding (W_b).

It is established that the static characteristic is linear approximately in the area $(-0,6I_{MC}W_k < I_x < +0,6I_{MC}W_k)$. And also the sensitivity of the MCC is largely determined by the resistance value of the ballast resistor (R), the number of turns of

the collector winding (W_k) and it grows with a decrease in W_k and with an increase in R .

An analysis of the expression for the static characteristic of the MCC with a digital output and with a discrete filter has shown that the discrete filter does not affect the shape of the static characteristic of the MCC.

REFERENCES

1. Amirov S. F., Ataullaev A. O. (2019) Mathematical Models of Linear Magnetic Chains of Electromagnetic Converters of Flow with a Ring Channel. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 6 (6), 9677–9682.
2. Amirov S. F., Ataullaev N. O. (2016) Performance of Magnitemodulating Current Sensor. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (7), 2337–2346.
3. Ataullaev N. O. (2014) Study of Measurements of Large Direct Currents in Chemical and Metallurgical Industries. *Prospects for Science and Production of Chemical Technology in Uzbekistan. Proceedings of the Scientific and technical Conference*. Navoi, 164–165 (in Russian).
4. Jumaev O. A., Karpovic D. S., Ismoilov M. T. (2022) Methods for Digital Signal Processing and Digital Filter Synthesis. *AIP Conference Proceedings*, 2656 (1), 020026. <https://doi.org/10.1063/5.0106311>.
5. Ataullaev N. O., Ataullaeva N. B. (2015) Study of Magnetic Modulation Sensors. *Mining and Metallurgical Complex: Achievements, Problems and Modern Development Trends. Proceedings of the Scientific and Technical Conference*. Navoi (in Russian).
6. Ripka P. (ed.) (2001) *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Boston, Artech House.
7. Razin G. I., Shchelkin A. P. (1974) *Non-Contact Measurement of Electric Currents*. Moscow, Atomizdat Publ. 160 (in Russian).
8. Bronstein I. N., Semendyaev K. A. (1986) *Handbook of Mathematics for Engineers and Students of Higher Education Institutions*. 13th ed. Moscow, Nauka Publ. 544 (in Russian).
9. Lebedev V. D., Yablokov A. A., Lebedev D. A., Naumov A. V., Mironov S. V. (2017) *High Voltage Digital Device for Measuring Current*. Patent of Russia (RU) No 170116 (in Russian).
10. Novgorodtsev A. B. (2004) *Calculation of Electrical Circuits in MATLAB: A Training Course*. St. Petersburg, Peter Publ. 250 (in Russian).
11. Ataullaev N., Ataullaev A., Karimtoшович S. M. (2021). Control and Management of the Operating Modes of Batteries with the use of Magnetic Modulation Converters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1047 (1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1047/1/012030>.
12. Ataullaev N. O., Nizomova D. F., Muxammadov B. Q. (2021) Mathematical Models of Magnetic Circuits of a Magnetomodulation DC Converter. *Journal of Physics: Conference Series*, 2094 (5), 052039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/5/052039>.

Received: 19.06.2023

Accepted: 21.08.2023

Published online: 29.09.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-433-440>

УДК 656.131:656.138:656.016:65.011.42:33.338.001.36

Механизм развития транспортно-логистической системы: инфраструктуры электрического транспорта

Канд. экон. наук, доц. Д. Н. Месник¹⁾, асп. Д. А. Вечёрко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В Республике Беларусь в 2021 г. объем потребления электроэнергии на зарядных станциях вырос примерно на 38 % по сравнению с 2020 г. и составил около 10 млн кВт·ч. Белорусскими экспертами отмечено, что в эксплуатации электромобиль примерно в два раза выгоднее его владельцу, чем автомобиль с двигателем внутреннего сгорания. В целом для экономики при условии равенства загрязнения окружающей среды на этапах добычи природных ресурсов и утилизации электронных отходов электромобиль сохраняет за собой выигрыш. Обновление автомобильного парка ископаемого топлива транспортными средствами на возобновляемых источниках энергии является задачей, требующей реализации механизма адаптации транспортно-логистической системы к современным вызовам глобальной экономики. К настоящему времени в Беларуси численность электромобилей и подзаряжаемых гибридов немного более 10 тыс. единиц. Отмечено увеличение парка общественного электротранспорта – свыше 100 электробусов. В свою очередь, развитие IT-сферы и продиктованная необходимостью перехода к производству транспортных средств на экологически чистые виды стандарта Евро-7, внедрение которого ожидается с 2025 г., подтолкнули мировых производителей автомобилей к производству электромобилей и подзаряжаемых гибридов, которые по экологическим параметрам превосходят аналоги на ископаемом топливе и отвечают времени роста располагаемого дохода массового потребителя. Во избежание потерь экономической выгоды с обновлением автомобильного парка электромобилями в статье исследован механизм адаптации инфраструктуры автотранспортного сервиса к современным вызовам глобальной экономики.

Ключевые слова: электромобиль, транспорт, инфраструктура, механизм, цифровые технологии, «зеленая» экономика

Для цитирования: Месник, Д. Н. Механизм развития транспортно-логистической системы: инфраструктуры электрического транспорта / Д. Н. Месник, Д. А. Вечёрко // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 433–440. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-433-440>

Mechanism for Development of Transport and Logistics System: Electric Transport Infrastructure

D. N. Mesnik¹⁾, D. F. Vecherko¹⁾

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

Abstract. In the Republic of Belarus in 2021, the volume of electricity consumption at car charging stations increased by about 38 % compared to 2020 and amounted to about 10 million kW·h. Belarusian experts noted that the operation of an

Адрес для переписки

Месник Дмитрий Николаевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-31
eut_atf@bntu.by

Address for correspondence

Mesnik Dmitriy N.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-31
eut_atf@bntu.by

electric car is about 2 times more profitable for its owner than a car with an internal combustion engine. In general, for the economy, under the condition of equality of environmental pollution at the stages of extraction of natural resources and the disposal of electronic waste, the electric car retains a win. Renewal of the fossil fuel vehicle fleet with vehicles powered by renewable energy sources is a task that requires the implementation of a mechanism for adapting the transport and logistics system to modern challenges of the global economy. To date, the number of electric vehicles and rechargeable hybrids in Belarus is slightly more than 10 thousand units. An increase in the public electric transport fleet was noted – over 100 electric buses. In turn, the development of the IT sector and the need to switch to the production of vehicles for environmentally friendly types of the Euro-7 standard, the introduction of which is expected from 2025, prompted global car manufacturers to produce electric vehicles and rechargeable hybrids, which are superior in environmental parameters to fossil-based counterparts fuel and correspond to the time of growth of the disposable income of the mass consumer. In order to avoid the loss of economic benefits with the renewal of the car fleet with electric vehicles, the paper examines the mechanism for adapting the infrastructure of the motor transport service to the modern challenges of the global economy.

Keywords: electric vehicle, transport, infrastructure, mechanism, digital technologies, “green” economy

For citation: Mesnik D. N., Vecherko D. F. (2023) Mechanism for Development of Transport and Logistics System: Electric Transport Infrastructure. *Science and Technique*. 22 (5), 433–440. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-433-440> (in Russian)

Введение

Электротранспорт с нулевым выбросом углекислого газа среди всех видов транспортных средств выглядит прорывным инновационным решением, повлиявшим на экономические, социальные и экологические процессы в обществе [1, 2]. Эти процессы тесно связаны с механизмом развития транспортно-логистической системы. Транспортно-логистическая система – это сплетение цепочек создания добавленной стоимости участниками перевозок грузов и пассажиров, инфраструктуры обслуживания (в том числе финансовых организаций) и других институтов, охваченных потоками материальными, информационными, денежными, потребления электроэнергии и объединенных целью наращивания стоимости собственного капитала.

Риск сведения выгод от выбросов в атмосферу к нулю вполне оправдан и исходит от конструктивных особенностей (объемов, габаритных размеров) литий-ионных батарей, которыми укомплектован электрический транспорт. В 2021 г. потребление электроэнергии литий-ионными батареями в мире составило около 340 ГВт·ч, или почти в два раза выше уровня 2020 г. Средняя емкость батарей аккумуляторных электромобилей (BEV) сократилась с 56 кВт·ч в 2020 г. до 55 кВт·ч в 2021 г., тогда как средняя емкость батарей подзаряжаемых гибридов выросла с 13 кВт·ч в 2020 г. до 14 кВт·ч в 2021 г. Рассчитанная средневзвешенная емкость аккумуляторной батареи электромобиля в 2021 г. составила около 20325 Вт·ч.

Спрос на аккумуляторы других видов транспортных средств в мире продемонстрировал прирост примерно на 65 %. Наибольшая доля спроса на аккумуляторные батареи пришлась на Китай. В Китае спрос на аккумуляторные батареи приблизился к 200 ГВт·ч в 2021 г., или показал рост примерно 140 % по сравнению с 2020 г. В то время как по Европейскому региону рост спроса на аккумуляторные батареи составил около 70 %, или в два раза ниже, чем в Китае [3, 4].

Первые электрозаправочные станции Маланка в Республике Беларусь открылись в 2014 г. И зарядка на этих станциях была по нулевому тарифу. Платная зарядка осуществляется с конца 2020 г. В январе 2022 г. тариф быстрой зарядки литий-ионной батареи (до 20 мин) составлял 39 коп./кВт·ч, а медленной зарядки (около 2 ч) 29 коп./кВт·ч. С мая 2022 г. тарифы выросли: быстрой зарядки – до 45 коп./кВт·ч, медленной зарядки – до 35 коп./кВт·ч. К настоящему времени отмечен рост тарифов зарядных станций Беларуси, тем не менее сохранен самым низким их уровень по сравнению со странами ЕС и СНГ.

В перспективе – беспроводной (бесконтактный) способ зарядки электромобилей. Сегодня этот способ скрывает в себе опасность передачи через воздушную подушку энергии большой мощности. Требуется доработка инженерной мысли по развитию транспортной инфраструктуры населенных пунктов, расположенных в границах до 2 км от круглогодично эксплуатируемых дорог.

Основная часть

В мире в 2021 г. на одну зарядную станцию приходилось девять электромобилей, каждым из которых в сутки затрачено два с половиной часа работы зарядного устройства. Одновременно в мире каждую секунду продается 2,4 автомобиля, в том числе на объем продаж в мире за секунду приходится примерно 0,79 электромобиля, или продажа электромобилей и подзаряжаемых гибридов за один час приблизительно составляет 284 единицы.

Доступность зарядных устройств в мире превысила 1 800 000 обустроенных мест, из которых почти 30 % приходится на места быстрой зарядки электромобилей. Только за 2021 г. в эксплуатацию запущено около 0,5 млн зарядных станций. В период 2015–2019 гг. среднегодовой темп роста зарядных станций почти достиг уровня 50 %. Так, в 2021 г. темп роста численности устройств быстрой зарядки достиг 48 %, что на 5 % выше по сравнению с 2020 г., устройств медленной зарядки – 33 %, или на 13 % ниже, чем в 2020 г.

Парк автомобилей мира за 2021 г., по данным «Коммерсанта» (со ссылкой на государственную инспекцию безопасности дорожного движения), насчитывает около 64 млн единиц, при этом 50,3 млн пришлось на легковые автомобили, 6,6 млн – на грузовые транспортные средства и примерно 843 тыс. единиц – на автобусы.

Необходимая численность зарядных станций зависит от таких факторов, как: региональная численность населения, имеющего право вождения соответствующей категории; средний пробег автомобилем региона; плотность населения региона. Тем не менее в 2021 г. количество зарядных установок в мире выросло до 1,8 млн, на одну зарядную установку приходится около девяти электромобилей. Одна зарядная установка за сутки с продолжительностью зарядки электромобиля 300 мин способна обслужить около 4,8 электромобиля. В такой норматив вложились далеко не все страны, исключение составили Нидерланды и Корея. На одну зарядную установку в Китае приходится 9–10 электромобилей. Таким образом, рост мирового рынка (0,79 электромобиля в секун-

ду) требует введения в эксплуатацию и увеличения доступа к общественной заправке (1,476 зарядной установки в секунду). Потребители электромобилей желают иметь такой же комфорт длительных поездок, как от автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. В 2021 г. введено в эксплуатацию 500 тыс. зарядных установок, в мире насчитывалось 1,8 млн установок. Если принять в расчет 238 рабочих дней в году, режим односменной работы и продолжительность смены 8 ч, то в секунду фактически введено в эксплуатацию 0,26 зарядной установки. Этого недостаточно для удовлетворения потребности, требуется увеличение общественного доступа к зарядным установкам в 5,68 раза, что реально разрешить наращиванием производства установок быстрой зарядки и аккумуляторных батарей.

На сегодняшний день получили развитие различные технологии зарядных станций, проектирование которых потребовало соблюдение стандартов. В Японии придерживаются стандарта CHAdeMO. Обществом автомобильных инженеров разработан стандарт SAE 1772, который нашел широкое использование на территории США. Международной энергетической комиссией проработан стандарт IEC к практическому использованию странами ЕС, EAEU (Eurasian Economic Union), Китаем.

Применение на зарядных станциях протокола CHAdeMO и протокола SAE 1772 “Combo” позволяет зарядить батареи электромобилей до 80 % за 20–30 мин и более активно использовать IT-услуги встроенных в электромобиль устройств электронной помощи (ABS, Hill Holder и др.), системы беспилотного управления с функцией адаптивного круиз-контроля, навигации и телеметрии, благодаря которым несложно определить местонахождения ближайшей зарядной станции.

В Беларуси за период 2018–2022 гг. число зарядных станций выросло с 14 до 486 единиц (прогноз до 1300 единиц к концу 2030 г.), которыми обеспечена возможность обслуживания свыше 15 тыс. электромобилей и подзаряжаемых гибридов [5–7].

С ростом зарядных устройств и приведением их численности к требуемому количеству электромобилей и подзаряжаемых гибридов по

усредненному времени зарядки 5 ч литий-ионной батареи существующая нагрузка на электросети колоссально вырастет. Нарастание пропускной способности электросетей потребует значительных инвестиций, которые не могут не повлиять на рост тарифов зарядных станций. Поэтому ценовой фактор, увеличивающий потребительские расходы владельцев электромобилей, окажет отрицательное влияние на спрос. В свою очередь, сокращение спроса на электромобили вызовет у производителя реакцию к сокращению предложения. Интерес инвесторов будет направлен на сужение срока окупаемости вложенных инвестиций и в расширение сети передачи энергии, что завершится очередным витком роста тарифов на зарядных станциях и повлияет на дальнейшее уменьшение спроса на электромобили. В результате, полезный внешний эффект от замещения электромобилями традиционных автомобилей с двигателями внутреннего сгорания окажется под угрозой нивелирования.

Производство и эксплуатация медленной зарядки аккумуляторных батарей для электромобилей и развитие инфраструктуры зарядных станций продолжительностью полной зарядки батареи в течение 5 ч для стран с малой экономикой выглядят более приемлемым вариантом. Так, дополнительная нагрузка на электросети от 470535,21 Вт в сутки может быть обеспечена изменением структуры в энергетическом балансе страны (пример – Беларусь). В этой связи объем инвестиционных вложений в развитие электросетей вполне по силам государству. Сокращение выбросов CO₂ обновлением парка автомобилей (скажем, таксомоторного парка), рассчитанных по полному циклу для электромобилей, составит от 32 кг в сутки из расчета на одну зарядную установку медленной зарядки аккумуляторных батарей электромобилей. В год сокращение нагрузки выброса CO₂ от 448 зарядных установок составит примерно 0,556 кг, или 0,72 % выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных источников на душу населения Республики Беларусь (по данным национального статистического комитета Республики Беларусь за 2020 г.). Оборудование населенного пункта с численностью проживающих 100 тыс. чело-

век пятью зарядными установками позволит получить эффект снижения нагрузки выброса CO₂ примерно 0,584 кг в год, или почти 0,76 % объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных источников на душу населения Республики Беларусь. Текущие расходы на охрану атмосферного воздуха, сохранение озонового слоя и климата за 2020 г. примерно равны 151,6 млн руб. в текущих ценах, что по среднему официальному курсу НБ Республики Беларусь белорусского рубля к доллару США, рассчитанного как средняя арифметическая величина (2,44), составило 61,91 млн дол. США. В стоимостном выражении экономический эффект от введенных в эксплуатацию 448 зарядных установок с обслуживанием одной установкой 4,8 электромобилей в сутки позволяет сократить текущие расходы на охрану атмосферного воздуха, сохранение озонового слоя и климата в объеме 445,75 тыс. дол. США в год. Тогда как для населенного пункта численностью 100 тыс. человек, оборудованного пятью зарядными установками, экономический эффект в сокращение текущих расходов на охрану атмосферного воздуха, сохранение озонового слоя и климата составляет 5,25 тыс. дол. США в год.

Однако модернизация по подключению к электросети зарядного оборудования влечет за собой затраты времени. В зависимости от региональной юрисдикции на проектирование и ввод в эксплуатацию зарядных станций аккумуляторных батарей электромобилей (особенно для зарядок высокого напряжения) требуется время от десятка месяцев до более четырех лет.

Практическое применение цифровых технологий на основе современного электронного оборудования, которыми оснащены электромобили, зарядные установки, не только потребует дополнительных инвестиций в развитие инфраструктуры электронного транспорта, но и окажет доступ к незаменимому информационному ресурсу в регулировании спроса и предложения на электроэнергию пиковой потребности. Электроэнергия является товаром с высокой добавленной стоимостью. Страны, производящие на экспорт электроэнергию, с развитием транспортно-логистической системы на основе электронного транспорта получают роль доминиру-

вания в развитии экономики не только на региональном уровне, но и в мире. Высокие темпы роста экспорта положительно отразятся на торговом балансе страны. Рост валового внутреннего продукта для ряда стран не будет выглядеть недостижимой мечтой. Здесь скрыт потенциал новых возможностей многих стран, в том числе Республики Беларусь [3, 8, 9]. Оснащение станций установками интеллектуальной зарядки благоприятно скажется на сокращении инвестиций по модернизации электросетей. Устранение вопроса трудной управляемости в распределении нагрузки на электросети позволит удовлетворить растущий спрос на электромобили и подзаряжаемые гибриды. Централизованному управлению установками интеллектуальной зарядки эффективно применить дифференцированные тарифы на время сглаживания пикового спроса потребителей, о чем своевременно и легче будет информировать водителей электромобилей в чате цифровой платформы либо посредством общественной коммуникационной связи (социальной сети), а также открыть возможности взаиморасчетов криптовалютой за оказанные услуги [10].

Зарубежный опыт эффективного подхода модернизации электросети невысокими объемами инвестиций применим на практике введением адаптивного смарт-чаринг (Smart-Charing, услуга для тех владельцев электромобилей и подзаряжаемых устройств, кто ценит свое время). Адаптированный смарт-чаринг упрощает работу операторов зарядных станций обеспечением информацией в реальном режиме времени о нагрузках на электросети в географическом квадрате расположения зарядных установок. При пиковом потреблении электроэнергии в географическом месте расположения станции интеллектуальной зарядки оператор принимает решение о сигнализации своих клиентов. Таким образом, интеллектуальные счетчики и оборудование для измерения электросетей нивелируют проблему отсутствия технологии своевременного реагирования на спрос услуг зарядных станций. Со временем собранные данные о спросе и тарифах на электроэнергию, а также информацию о электронных отходах позволят выстроить модель адаптивных сигналов на прогнозируемые изменения пред-

ложения электромобилей и подзаряжаемых гибридов. Не имея представления о положении дел с электронными отходами в мировом масштабе, невозможно понять также и истинную природу трансграничных перевозок, а в некоторых случаях – и нелегальных поставок [11].

Не исключены случаи шоковых переживаний потребителей, когда симбиоз сложившейся структуры рынка и нормативно-правовой основы ряда стран не обеспечивает механизма поддержания тесной связи между операторами и потребителями. Чтобы заключить контракты между операторами DSO (Distribution System Operator – системы распределения) и потребителями их услуг, необходимо унифицировать стандарты стран, получивших развитие экологически чистого транспорта, с тем, чтобы обеспечить гибкость услуг с учетом особенностей местных электросетей по загруженности и выстроить модель по сбалансированности системы. Трансформационные преобразования экономики диктуют необходимость перехода от традиционных распределительных сетей к распределительным энергетическим системам. Здесь важен эффект распределения доходов от потребления электроэнергии сбалансированной системы. В стоимостном выражении этот эффект должен составить двукратный размер к эффекту от введения в эксплуатацию зарядных установок с обслуживанием одной установкой 4,8 электромобиля в сутки. Произведем расчет. Принимаем стоимость устройства медленной зарядки от 4 до 9 ч, мощность которого составляет от 7 до 22 кВт, 3240 дол. США. Плюс стоимость установки зарядного устройства (подведения коммуникаций и прочие расходы) – 10 % от стоимости устройства медленной зарядки и 3 % от стоимости устройства быстрой зарядки, что средневзвешенным расчетом составляет 891 дол. США. А также добавим стоимость продукта разработчиков IT-платформы в размере удвоенной суммарной стоимости зарядного устройства и ее установки – 5022 дол. США. Объем вложений без НДС и прочих налоговых отчислений составит 9153 дол. США. Для парка электромобилей численностью 24 единиц такой объем вложений в 1,74 раза превышает эффект в сокращение текущих расходов на охрану атмосферы

ного воздуха, сохранение озонового слоя и климата. В достижение экономически обоснованной адаптации автотранспортного сервиса к современным вызовам это превышение и расходы по утилизации электронных отходов логично компенсировать эффектом распределения доходов от потребления электроэнергии сбалансированной системы.

Республика Беларусь Указом № 447 от 22.11.2021 (в новой редакции Указ № 92 от 12.03.2020 «О стимулировании использования электромобилей») своевременно привела в действие меры экономико-организационного стимулирования развития электрического транспорта Беларуси и поддержала субъектов, имеющих на балансе зарядные устройства для электромобилей, освобождением от НДС и другими мерами [12, 13].

Иностранные энергосбытовые компании в управление спросом посредством геймификации задействовали потребителей. Так как серьезные изменения в структуре производства электроэнергии, где высокая доля принадлежит возобновляемым источникам энергии, привели к росту доли распределительных энергетических ресурсов, к пересмотру отношений между просьюмерами (субъектами, активно участвующими в производстве электроэнергии, потребляемой ими самими с использованием интеллектуальной сети), то роль в доставке электроэнергии покупателю у операторов распределительных сетей DNO (Distribution Network Operator) переняли операторы DSO. Что также является действенным подходом к стимулированию и поддержанию механизма развития транспортно-логистической системы в повышение экономического эффекта.

Эффект механизма адаптации автотранспортного сервиса к современным вызовам развития транспортно-логистической системы носит комплексный характер, который можно выразить в виде экономико-математической модели:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{общ}} = & \mathcal{E}_1 + (\pm \mathcal{E}_{\text{нал}} \pm \mathcal{E}_{\text{экол}} \pm \mathcal{E}_{\text{пр}} \pm \mathcal{E}_{\text{зу}} \pm \mathcal{E}_{\text{IT}}) + \\ & + \mathcal{E}_{\text{V2G}} + \mathcal{E}_3 \pm \Delta, \end{aligned}$$

где $\mathcal{E}_{\text{общ}}$ – эффект замещения электромобилями традиционные автомобили; $\mathcal{E}_1$ – то же добычи природных ресурсов, производства стали (ком-

позитного материала), аккумуляторных батарей; $\mathcal{E}_{\text{нал}}$ – то же налоговых маневров на топливо и электроэнергию; $\mathcal{E}_{\text{экол}}$ – то же снижения нагрузки и ущерба окружающей среды; $\mathcal{E}_{\text{пр}}$ – то же потребительских расходов на эксплуатацию электромобиля по сравнению с автомобилем, оборудованным двигателем внутреннего сгорания; $\mathcal{E}_{\text{зу}}$ – то же эксплуатации зарядных устройств аккумуляторных батарей автотранспортных средств на электрической тяге; $\mathcal{E}_{\text{IT}}$ – то же от задействования цифровых технологий в развитии электрического транспорта; $\mathcal{E}_{\text{V2G}}$ – то же транспортного средства – сеть концепции “vehicle-to-grid”; $\mathcal{E}_3$ – то же утилизации (в том числе электронных отходов); Δ – то же иных проявлений современных вызовов на развитие электрического и альтернативных видов транспорта, их инфраструктуры.

Инновационные подходы по производству новых автотранспортных средств (электромобили, гибридные автомобили и другие), а также обеспечение их нетрадиционными двигателями (водородные и т. п.), ускоренное развитие инфраструктуры будут способствовать снижению выбросов вредных веществ в атмосферу, поддержке возобновляемых источников энергии на транспорте, что позволит эффективно реализовать организационно-экономический механизм развития транспортно-логистической системы [14].

ВЫВОДЫ

1. Полученный внешний эффект обновления автомобильного парка и его доукомплектования электромобилями и подзаряжаемыми гибридами заключается в снижении ущерба окружающей среде и связанных с этим социальных издержек вследствие устранения негативного влияния на среду обитания человека, вызванного заторами на автомобильных дорогах, причинами побочных явлений инфраструктуры и другими, обусловленными не только загрязнением от мобильных источников, но и вибрациями, шумностью и т. п. В свою очередь, требуется рассмотрение вопросов о введении на законодательном уровне новых налогов на торговый экспорт нефтепродуктов и налоговых

сборов в отношении владельцев транспортных средств с нулевым выбросом углекислого газа.

2. Налоги и налоговые пошлины на автомобильное топливо, полученное из ископаемого источника (или нефти), являются одним из источников доходной части бюджета Республики Беларусь. Выполняя свою важную роль, они способствуют росту экономики благодаря активному вливанию инвестиций в дорожное строительство по всем направлениям транспортно-логистической системы. Поддержка строительства автомобильных путепроводов и электрификация железных дорог ускоряют развитие инфраструктуры транспортно-логистической системы страны. По сути, открываются новые источники налоговых поступлений в бюджет республиканского либо местного значения.

3. Ускоренное развитие инфраструктуры электромобилей и подзаряжаемых гибридов поспособствует развитию транспортно-логистической системы посредством механизма адаптации инфраструктуры автотранспортного сервиса к современным вызовам глобальной экономики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский [и др.] Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>.
2. Техническое обслуживание и ремонт городского электрического транспорта. Нормы и правила проведения: ТКП 314-2011 (02190). Введ. 01.09.2011. Минск: Энергопресс, 2015. 47 с.
3. Экономический механизм развития транспортно-логистической деятельности на предприятиях / Р. Б. Ивуть [и др.]. Минск: БНТУ, 2022. 240 с.
4. Ивуть, Р. Б. Развитие транспортной системы сферы услуг на основе информационно-коммуникационных технологий / Р. Б. Ивуть, Д. Н. Месник // Стратегия развития экономики Беларуси: вызовы, инструменты реализации и перспективы: сб. науч. статей: в 2 т. / ред. кол.: В. Л. Гурский [и др.]; Национальная академия наук Беларуси; Институт экономики НАН Беларуси. Минск: Право и экономика, 2021. Т. 2. С. 423–428.
5. Месник, Д. Н. Рынок пассажирских перевозок Республики Беларусь: развитие, структурные изменения, тенденции / Д. Н. Месник, Т. В. Пильгун, О. И. Мойсак // Новая экономика. 2021. № 1 (77). С. 68–80.
6. Ходас, А. К. Развитие транспортно-логистической системы Республики Беларусь / А. К. Ходас, Д. Н. Мес-

ник // Научные труды Белорусского государственного экономического университета. Минск: БГЭУ, 2021. Вып. 14. С. 475–481.

7. Месник, Д. Н. Модель развития экономических отношений транспортно-логистической деятельности / Д. Н. Месник, Т. В. Пильгун // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. трудов: в 2 т. / редкол.: Д. В. Капский (отв. ред.) [и др.]. Минск: БНТУ, 2020. Т. 2. С. 188–191.
8. Месник, Д. Н. Структурные сдвиги отраслей Республики Беларусь в посткризисный период и эффективность трансфертных преобразований / Д. Н. Месник // Аграрная экономика. 2019. № 8 (291). С. 24–33.
9. Месник, Д. Н. Потенциал развития промышленности и сельского хозяйства / Д. Н. Месник // Аграрная экономика. 2019. № 5 (288). С. 2–9.
10. Месник, Д. Н. Применение информационных технологий транспортными предприятиями: механизм майнинга криптовалюты на основе технологии блокчейн / Д. Н. Месник // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 2. С. 168–176. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-168-176>.
11. Форти, В. Глобальный мониторинг электронных отходов, 2020 год: Объем, потоки и потенциал циркуляционной экономики / В. Форти [и др.]. 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_RU_O21.pdf. Дата доступа: 09.10.2022.
12. Об изменении Указа Президента Республики Беларусь (корректируется Указ № 92 от 12 марта 2020 г. «О стимулировании использования электромобилей») [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 22.11.2021 г., № 447. Режим доступа: <https://president.gov.by/ru/documents/ukaz-no-447-ot-22-noyabrya-2021-g>. Дата доступа: 11.10.2022.
13. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. / Национальная комиссия по устойчивому развитию Республики Беларусь; редкол.: Я. М. Александрович [и др.]. Минск: Юнипак, 2014. 132 с.
14. Reliable Transport Infrastructure [Electronic Resource] // Sustainable, Safe and Digital: Perspectives for a Human-centered Mobility System. Mode of Access: <https://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/mobility/Center/Perspectives.pdf>. Date of access: 11.12.2019.

Поступила 08.11.2022

Подписана в печать 10.01.2023

Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Kapsky D. V., Kuzmenko V. N., Krasil'nikova A. S., Semchenkov S. S., Kot E. N., Larin O. N. (2022) Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 21 (2), 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157> (in Russian).

2. ТКР [Technical Code of Common Practice] 314–2011 (02190). *Maintenance and Repair of Urban Electric Transport*. Minsk, Energo-Press Publ., 2015. 47 (in Russian).
3. Ivut' R. B., Lapkovskaya P. I., Myasnikova O. V., Mesnik D. N. (2022) *Economic Mechanism for the Development of Transport and Logistics Activities at Enterprises*. Minsk, BNTU. 240 (in Russian).
4. Ivut' R. B., Mesnik D. N. (2021) Development of the Transport System of the Service Sector Based on Information and Communication Technologies. *Strategiya razvitiya ekonomiki Belarusi: Vyzovy, Instrumenty Realizatsii i Perspektivy: Sbornik Nauchnykh Statei. T. 2* [Strategy for the Development of the Belarusian Economy: Challenges, Implementation Tools and Prospects: a Collection of Scientific Articles. Vol. 2]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ., 423–428 (in Russian).
5. Mesnik D. N., Pilgun T. V., Moisey O. I. (2021) The Passenger Transportation Market of the Republic of Belarus: Development, Structural Changes, Trends. *Novaya Ekonomika* [New Economy], (1), 68–80 (in Russian).
6. Khodas A. K., Mesnik D. N. (2021) Development of Transportation and Logistics System of the Republic of Belarus. *Nauchnye Trudy Belorusskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta* [Scientific Works of the Belarusian State Economic University]. Minsk: BSEU, Iss. 14, 475–481 (in Russian).
7. Mesnik D. N., Pilgun T. V. (2020) Model for the Development of Economic Relations of Transport and Logistics Activities. *Avtotraktorostroenie i Avtomobil'nyi Transport: Sbornik Nauchnykh Trudov. T. 2* [Automotive and Tractor Building and Road Transport. Collection of Scientific Papers. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 188–191 (in Russian).
8. Mesnik D. N. (2019) Structural Changes in the Industries of the Republic of Belarus in the Postcrisis Period and the Efficiency of Transfer Reforms. *Agrarnaya Ekonomika = Agrarian Economics*, (8), 24–33 (in Russian).
9. Mesnik D. N. (2019) Potential for the Development of Industry and Agriculture. *Agrarnaya Ekonomika = Agrarian Economics*, (5), 2–9 (in Russian).
10. Mesnik D. N. (2020) Use of Information Technology by Transport Enterprises: Cryptocurrency Mining Mechanism Based on Blockchain Technology. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (2), 168–176 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-168-176>.
11. Forti V., Balde C. P., Kühr R., Bel G. (2020) *Global E-Waste Monitoring 2020: Quantities, Flows and the Circular Economy Potential*. Available at: https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_RU_O21.pdf (accessed 09 October 2022) (in Russian).
12. On amending the Decree of the President of the Republic of Belarus (correcting Decree No. 92 of March 12, 2020. “On Stimulating the Use of Electric Vehicles”): Decree of the President of the Republic of Belarus, 22.11.2021, No 447. Available at: <https://president.gov.by/ru/documents/ukaz-no-447-ot-22-noyabrya-2021-g> (accessed 10 November 2022) (in Russian).
13. Aleksandrovich Ya. M. (ed.) [et al.] (2014) *National Strategy for Sustainable Socio-Economic Development of the Republic of Belarus for the Period up to 2030*. Minsk, Yunipack, 2014. 132 (in Russian).
14. Reliable Transport Infrastructure. *Sustainable, Safe and Digital: Perspectives for a Human-Centered Mobility System*. Available at: <https://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/mobility/Center/Perspectives.pdf> (accessed 11 December 2019).

Received: 08.11.2022

Accepted: 10.01.2023

Published online: 29.09.2023