

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 4 / 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

- Коротеев А. О., Шукан Н. М., Фетисова Е. А.,
Коротеева А. А.**
Технологические особенности выбора значений
параметров режима дуговой сварки
в защитной газовой смеси Ar + CO₂ 269

Строительство

- Гуриненко Н. С., Батяновский Э. И.**
Защитная способность цементного бетона
с полифункциональной добавкой
по отношению к стальной арматуре 278
- Повколас К. Э.**
Оценка эффективности применения
горизонтальных инерционных барьеров
для снижения вибраций, распространяющихся
в грунтовой среде 286

CONTENTS

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Karatseyeu A. A., Shukan M. M., Fiatsisava K. A.,
Karatseyeva A. A.**
Technological Features of Selection
of Parameter Values of Arc Welding Mode
in Shielding Gas Mixture Ar + CO₂ 269

Civil and Industrial Engineering

- Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I.**
Protective Ability of Cement Concrete
with Polyfunctional Additive in Relation
to Steel Reinforcement 278
- Povkolas K. E.**
Evaluation of Effectiveness of Application
of Horizontal Inertial Barriers
to Reduce Vibrations Propagating
in Ground Environment 286

Петрусевич В. В.
Исследование влияния состава гидрофобного профилактического «Протект-01» на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий 294

Транспорт

Пегин П. А., Капский Д. В., Ильин А. А., Рунев Е. В.
Метод определения достаточности сети автомобильных дорог региона 301

Энергетика

Романюк В. Н., Струцкий Н. В.
Применяемые изоляционные покрытия распределительных газопроводов в Республике Беларусь и их характеристика 308

Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Дерюгина Е. А., Климкович П. И.
Принципы выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах 317

Дмитриев, С. М., Буров А. Л., Демкина Т. Д., Добров А. А., Доронков Д. В., Доронкова Д. С., Курицин Д. Д., Пронин А. Н., Рязанов А. В., Солнцев Д. Н.
Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора PWR с ТВС-Квадрат разных конструкций 326

Рыжова Т. В., Бухаров Д. Н., Аракелян С. М.
Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Часть 2 333

Экономика

Солодовников С. Ю., Мелешко Ю. В., Сюй Ц.
Факторы развития корпоративного управления в Китае 342

Petrusevich V. V.
Study of the Influence of the Composition of Hydrophobic Preventive “Protect-01” on the Physical and Mechanical Properties of Asphalt Concrete Pavement Materials 294

Transport

Pegin P. A., Kapski D. V., Ilyin A. A., Runev E. V.
Method to Define Whether the Road Network is Sufficient for the Region. 301

Power Engineering

Romaniuk V. N., Strutsky N. V.
Applied Insulating Coatings for Gas Distribution Pipelines in the Republic of Belarus and Their Characteristics 308

Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Klimkovich P. I.
Principles for Implementation of Digital Power Direction Control in Microprocessor Current Protections 317

Dmitriev S. M., Burov A. L., Demkina T. D., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Doronkova D. S., Kuritsin D. D., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N.
Coolant Hydrodynamics in the PWR Reactor Core with TVS-Kvadrat of Various Designs 326

Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan S. M.
Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects in Thermal Power Units. Part 2 333

Economy in Industry

Solodovnikov S. Yu., Meleshko Yu. V., Xu Jing
Factors for the Development of Corporate Management in China 342

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*), заместитель главного редактора,
- Бельй 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, Комотины, Греческая Республика),
Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),
Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),
Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижик 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 31.07.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд. л. 9,8. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет Заказ №

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023

Lead Science Editor

V. N. Guryanichy

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/10.21122/2227-1031-2023-22-4-269-277>

УДК 621.791.754

Технологические особенности выбора значений параметров режима дуговой сварки в защитной газовой смеси $Ar + CO_2$

Канд. техн. наук, доц. А. О. Коротеев¹⁾, инженеры Н. М. Шукан¹⁾, Е. А. Фетисова¹⁾, студ. А. А. Каротеева¹⁾

¹⁾Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет» (Могилев, Республика Беларусь)

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

Реферат. Сварка в среде защитных газов на сегодняшний день занимает лидирующее положение среди способов получения неразъемных соединений в промышленных условиях. Появление новых материалов со сложными системами легирования и упрочнения делает углекислый газ, традиционно применяемый в качестве защитной среды, неэффективным для использования. Одним из эффективных способов решения указанных проблем является изменение состава защитной газовой атмосферы, что позволяет существенно изменить физико-металлургические процессы плавления электродной проволоки и формирования сварного шва. В то же время переход на использование защитных газовых смесей на основе аргона, как правило, осуществляется без понимания сущности технологии и возможных проблем, связанных со спецификой проплавления основного металла, что может вызвать появление ряда серьезных проблем. В статье установлены важные закономерности между технологическими характеристиками дуговой сварки в защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ и параметрами режима в условиях отклонения их значений от наиболее эффективных с точки зрения обеспечения стабильности переноса электродного металла и формирования валика наплавленного металла шва. На основании экспериментальных данных установлены наиболее вероятные причины появления опасного и трудновывяляемого методами неразрушающего контроля дефекта формирования сварного шва в виде несплавлений между отдельными валиками наплавленного металла и по линии сплавления с основным металлом свариваемых деталей. Дефект является распространенным и может вызывать непредсказуемое разрушение сварного соединения без видимых пластических деформаций. Предложены эмпирические зависимости определения значений основных параметров режима. Установлены важные закономерности, позволяющие повысить эффективность технологии дуговой сварки в среде защитных газовых смесей в условиях отечественного производства.

Ключевые слова: дуговая сварка в защитных газах, защитные газовые смеси, несплавления, дефект формирования сварного шва, коэффициент потерь электродного металла, коэффициент разбрызгивания

Для цитирования: Технологические особенности выбора значений параметров режима дуговой сварки в защитной газовой смеси $Ar + CO_2$ / А. О. Коротеев [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 269–277. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-269-277>

Technological Features of Selection of Parameter Values of Arc Welding Mode in Shielding Gas Mixture $Ar + CO_2$

A. A. Karatseyeu¹⁾, M. M. Shukan¹⁾, K. A. Fiatsisava¹⁾, A. A. Karatseyeva¹⁾

¹⁾Inter-State Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University” (Mogilev, Republic of Belarus)

Abstract. Gas-shielded arc welding today occupies a leading position among the methods for producing permanent joints in industrial conditions. The emergence of new materials with complex alloying and hardening systems makes carbon dioxide,

Адрес для переписки

Коротеев Артур Олегович
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет»
просп. Мира, 43,
212000, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 22 224-47-77
karatseyeu_artur@fastmail.com

Address for correspondence

Karatseyeu Artur A.
Inter-State Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”
43, Mira Ave.,
212000, Mogilev, Republic of Belarus
Tel.: +375 22 224-47-77
karatseyeu_artur@fastmail.com

traditionally used as a protective medium, inefficient for use. One of the effective ways to solve these problems is to change the composition of the protective gas atmosphere, which allows you to significantly change the physical and metallurgical processes of melting the electrode wire and the forming the weld. At the same time, the transition to the use of protective gas mixtures based on argon is usually carried out without understanding the essence of the technology and possible problems associated with the specifics of penetration of the base metal, which can cause a number of serious problems. The present paper describes important regularities between technological characteristics of arc welding in a shielding gas mixture Ar + CO₂ and welding mode parameters under conditions of deviation of their values from the most effective ones in order to ensure the stability of the processes of electrode metal transfer and the formation of the deposited weld metal bead. On the basis of experimental data, the most probable causes of the appearance of a dangerous and difficult-to-detect defect in the formation of a welded seam in the form of non-fusion between individual beads of the deposited metal and along the fusion line with the base metal of the welded parts have been established. The defect is common and can cause unpredictable failure of the welded joint without visible plastic deformation. Empirical dependences for determining values of the main parameters of the welding mode are proposed as well. Important regularities have been established that make it possible to increase the efficiency of arc welding technology in the environment of protective gas mixtures in the conditions of domestic production.

Keywords: gas-shielded arc welding, shielding gas mixtures, non-fusion, weld formation defect, electrode metal loss coefficient, spatter coefficient

For citation: Karatseyeu A. A., Shukan M. M., Fiatsisava K. A., Karatseyeva A. A. (2023) Technological Features of Selection of Parameter Values of Arc Welding Mode in Shielding Gas Mixture Ar + CO₂. *Science and Technique*. 22 (4), 269–277. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-269-277> (in Russian)

Введение

Дуговая сварка в среде защитных газов является наиболее распространенным способом получения неразъемных соединений металлоконструкций и изделий на предприятиях машиностроительной отрасли Республики Беларусь и стран зарубежья. В качестве защитной среды в большинстве случаев используется углекислый газ (CO₂). Несмотря на известные на сегодняшний день недостатки такой технологии, связанные с повышенным разбрызгиванием электродного металла, а также более низкими показателями ударной вязкости и пластичности шва, такая защитная газовая среда до настоящего времени продолжает использоваться при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Активное развитие металлургии и появление новых сталей и сплавов, позволяющих существенно повысить характеристики сварных конструкций при одновременном снижении металлоемкости и сохранении требуемых условий обеспечения хорошей свариваемости, ставят эффективную на протяжении длительного времени технологию в еще более сложные условия, в которых она зачастую уже не способна обеспечить предъявляемые к сварным соединениям требования.

Перспективное направление совершенствования технологического процесса в таких условиях – переход на использование защитных газовых смесей на основе аргона (Ar + CO₂, Ar + CO₂ + O₂, Ar + O₂). Такая газовая среда яв-

ляется более инертной, так как основу (более 80 %) составляет Ar, и позволяет не только применить ее для материалов с более сложной системой легирования и упрочнения, но и устранить ряд характерных, отмеченных выше, недостатков сварки в CO₂. При этом на сегодняшний день повышение затрат, вызванное более высокой стоимостью защитных газовых смесей на основе аргона, обосновано, так как во многих случаях химический состав современных низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей не позволяет эффективно применить для защиты активный углекислый газ, окислительный потенциал которого приводит к снижению требуемой концентрации легирующих элементов в наплавленном металле.

Важно отметить, что спецификой перехода на использование смесей Ar + CO₂ на отечественных предприятиях являются достаточно большая «инертность» и сохранение по возможности существующей документации, разработанных технологических инструкций с минимальными изменениями, как правило, не касающимися значений параметров режима сварки. Обоснованием этого является мнение о том, что более инертная, но в целом «подобная», защитная газовая атмосфера не несет каких-либо существенных изменений с точки зрения протекания основных процессов при сварке. Сохраняются те же сварочные материалы, разработанные для сварки в углекислом газе (сварочные проволоки Св-08Г2С

и Св-08ГС), а также соотношения между напряжением на дуге и силой сварочного тока. Особенности использования подобных проволок для сварки в среде $Ar + CO_2$ рассмотрены нами ранее [1].

На протяжении длительного времени на основании большого количества статистических данных результатов механических испытаний сварных соединений, полученных с использованием смесей $82\% Ar + 18\% CO_2$, при проведении процедур аттестации технологических процессов сварки и сварщиков нами выявлена достаточно серьезная характерная проблема, сущность которой заключается в образовании весьма опасного и трудновывявляемого методами неразрушающего контроля дефекта в виде несплавлений по кромке основного металла и между отдельными валиками (рис. 1) [2–8].

Основная причина этого, помимо некачественной подготовки деталей под сварку и зачистки промежуточных валиков от выделений шлака на поверхности и прочих загрязнений перед наложением последующих швов, заключается в некорректном выборе значений параметров режима сварки, в частности соотношений между значениями напряжения на дуге и силой тока. Также следует отметить, что техника выполнения сварного шва, подразумевающая определенную траекторию движения плавящегося торца электродной проволоки относительно кромок свариваемых деталей и обуславливающая поведение жидкого металла сварочной ванны и заполнение им разделки кромок, в случае применения смесей на основе аргона будет отличаться от традиционно используемой и привычной для сварщиков на большинстве отечественных предприятий техники сварки в среде CO_2 . В силу специфического характера проплавления основного металла с ярко выраженным увеличением глубины по оси шва возникает вероятность образования наплывов жидкого металла на нерасплавленные кромки, что будет способствовать образованию физического контакта, но недостаточно для образования прочных химических связей, разрушения оксидных пленок на поверхности и объемного взаимодействия с образованием прочного соединения. При этом формируются

ослабленные участки между отдельными валиками, являющиеся причинами разрушения сварного соединения.

Основная часть

Главная цель проводимых исследований – разработка методики выбора параметров режима сварки с учетом возможных отклонений значений от оптимальных ввиду специфики выполнения сварного шва. Основными технологическими показателями процесса сварки являются коэффициент наплавки, коэффициент потерь электродного металла, глубина проплавления основного металла и ширина валика шва, а также коэффициент формы, определяющийся отношением ширины валика к глубине проплавления [9–10]. Экспериментальные исследования проведены для проволок с использованием робототехнического комплекса для минимизации колебаний значений параметров режима и вылета электродной проволоки. Для получения защитной газовой смеси требуемого состава ($82\% Ar + 18\% CO_2$) использовался однопостовой газовый смеситель WITT VM-2M. Расход защитной газовой смеси выбирался по расходомеру, интегрированному со смесителем, и составил $14\text{--}15$ л/мин. Сущность проводимых экспериментов заключалась в наплавке валиков на пластины из низкоуглеродистой стали 09Г2С толщиной 12 мм с высокочастотной регистрацией значений параметров режима по средствам осциллографирования силы тока и напряжения на дуге. Массу наплавленного металла определяли при помощи взвешивания пластин до и после наплавки.

Коэффициенты наплавки и потерь электродного металла – важнейшие параметры, определяющие не только производительность процесса, но и эффективность применяемой технологии в целом (рис. 2, 3).

Коэффициент потерь включает в себя потери электродного металла на разбрызгивание, угар и испарение и является комплексным показателем, используемым для нормирования присадочных материалов и определения эффективности их применения для сварки и наплавки (рис. 2).

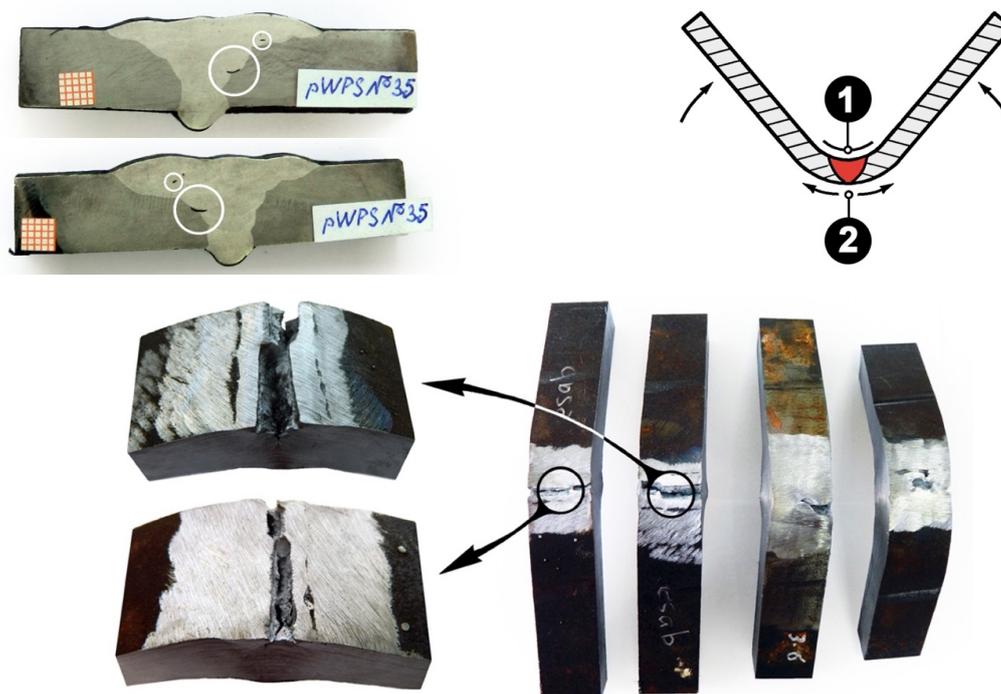


Рис. 1. Внешний вид дефекта сварного шва в виде несплавления по кромке основного металла и между отдельными валиками: 1 – лицевая поверхность шва; 2 – поверхность корневой части шва

Fig. 1. View of weld defect in the form of lack of fusion along the edge of the base metal and between individual beads: 1 – weld face; 2 – weld root surface

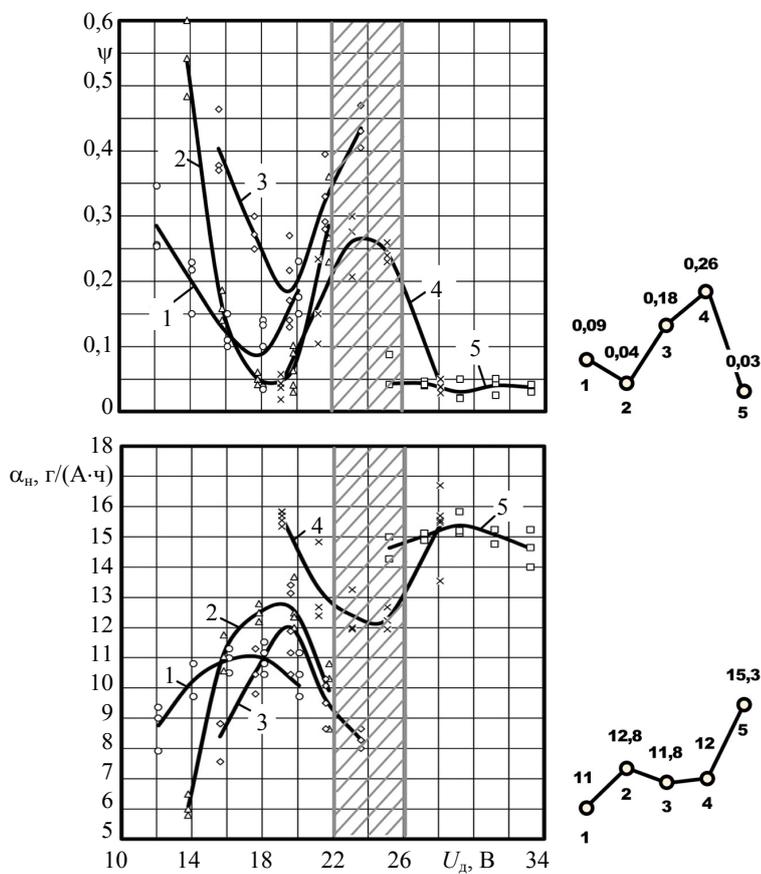


Рис. 2. Графические зависимости коэффициента потерь электродного металла (ψ) и коэффициента наплавки (α_n) от напряжения на дуге (U_d) при различном значении силы тока (I_{cb}): 1 – $I_{cb} = 100$ А; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 250; 5 – 300 А

Fig. 2. Graphical dependencies of the loss coefficient of electrode metal (ψ) and the deposition coefficient of electrode metal (α_n) on arc voltage (U_d) at different current strength values (I_{cb}):

1 – $I_{cb} = 100$ А; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 250; 5 – 300 А

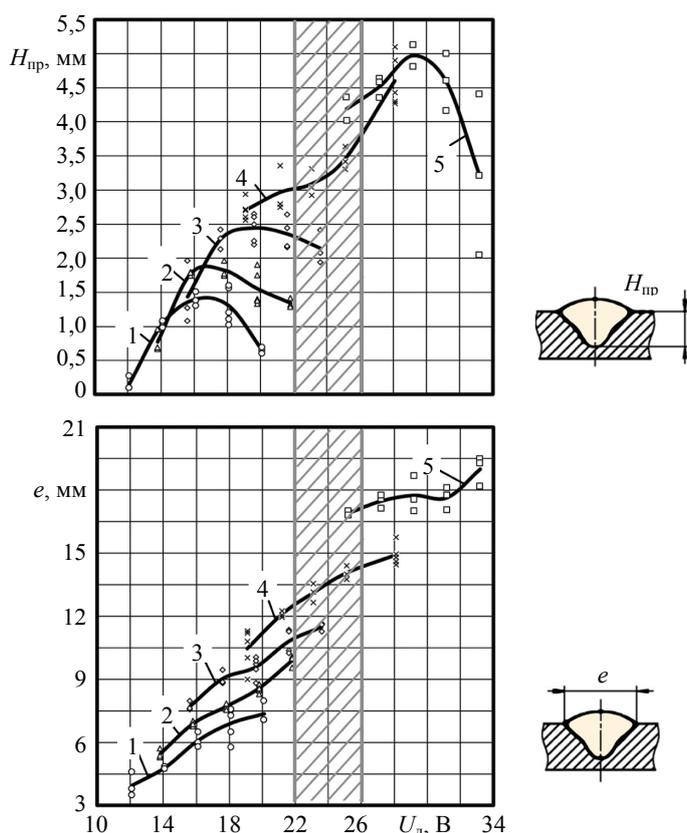


Рис. 3. Графические зависимости глубины проплавления основного металла ($H_{пр}$) и ширины валика наплавленного металла (e) от напряжения на дуге ($U_{д}$) при различном значении силы тока ($I_{св}$): 1 – $I_{св} = 100$ А; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 250; 5 – 300 А

Fig. 3. Graphical dependencies of penetration depth of base metal ($H_{пр}$) and width of deposited metal bead (e) on arc voltage ($U_{д}$) at different current strength values ($I_{св}$): 1 – $I_{св} = 100$ А; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 250; 5 – 300 А

Анализ полученных данных показал, что отклонения от оптимального соотношения между силой тока $I_{св}$ и напряжением на дуге $U_{д}$ приводят к чрезвычайно резкому росту значения коэффициента потерь (рис. 2). Например, для тока 150 А изменение напряжения на дуге на 2–3 В приводит к повышению потерь в 3–5 раз. В области существования переноса электродного металла короткими замыканиями или капельного переноса (значения силы тока 100–200 А) в диапазоне значений напряжения на дуге до 22 В характер зависимостей имеет ярко выраженные минимумы, соответствующие наиболее эффективному соотношению между значениями параметров режима с точки зрения стабильности процесса.

Область, лежащая в диапазоне значений напряжения на дуге 22–26 В для $I_{св} = 250$ А,

является нестабильной из-за наличия переходных процессов и близости к критическому значению силы тока струйного переноса. При этом повышение напряжения и как следствие увеличение длины дуги будут создавать необходимые условия для возникновения струйного переноса и резкого уменьшения потерь металла до 0,03 (3 %) в связи с практически полным отсутствием разбрызгивания. Снижение же напряжения на дуге на 3–5 В будет стабилизировать процесс в области капельного переноса, что также будет более предпочтительным с точки зрения снижения показателей разбрызгивания.

Коэффициент наплавки характеризует производительность процесса, выраженную в массе наплавленного металла в единицу времени (рис. 2). Непосредственная связь с коэффициентом потерь обуславливает аналогичный характер графических зависимостей. Совмещенный анализ полученных данных свидетельствует о высокой чувствительности процесса к нарушению соотношений между силой тока и напряжением на дуге.

Важнейшие характеристики для разработки технологических процессов сварки – глубина проплавления и ширина валика наплавленного металла, так как они определяют геометрические параметры шва и соответствие его требованиям нормативной документации. Представленные на рис. 3 графические зависимости глубины проплавления основного металла и ширины валика наплавленного металла в зависимости от напряжения на дуге при различной силе тока показали, что изменение значений напряжения при стабильной величине силы тока может привести к изменению глубины проплавления более чем в два раза. Например, при силе тока 150 А снижение напряжения с 16 до 14 В снизит глубину проплавления с 2,0 до 0,6 мм.

В то же время, повышение напряжения свыше оптимального для данных условий также будет приводит к некоторому снижению глубины проплавления в связи с рассредоточением ввода теплоты в основной металл из-за увеличения длины дуги, а также некоторого снижения ее температуры. Крайне важным в этом случае является тот факт, что, несмотря на

кажущуюся очевидность прямой зависимости между силой тока и глубиной проплавления основного металла, отклонение от наиболее эффективных соотношений с напряжением на дуге существенно нарушает эту зависимость и в некоторых случаях может привести к отклонению от ожидаемых и требуемых значений глубины проплавления.

На рис. 4, 5 представлены графические зависимости наиболее эффективных значений напряжения на дуге от силы тока с точки зрения минимизации потерь на разбрызгивание и максимальных значений коэффициента наплавки, а также глубины проплавления от силы тока для этих значений напряжения. Графо-аналитически предложены эмпирические зависимости между силой тока и напряжением на дуге, представленные на графиках рис. 4, а также между глубиной проплавления и силой сварочного тока, представленные на графиках рис. 5:

$$U_{д} = 12 + 0,04I_{св}; \quad (1)$$

$$U_{д} = 11 + 0,06I_{св}; \quad (2)$$

$$H_{пр} = 0,5 + 0,01I_{св}; \quad (3)$$

$$H_{пр} = -5,5 + 0,035I_{св}, \quad (4)$$

где $I_{св}$ – сила тока, А; $H_{пр}$ – глубина проплавления основного металла, мм.

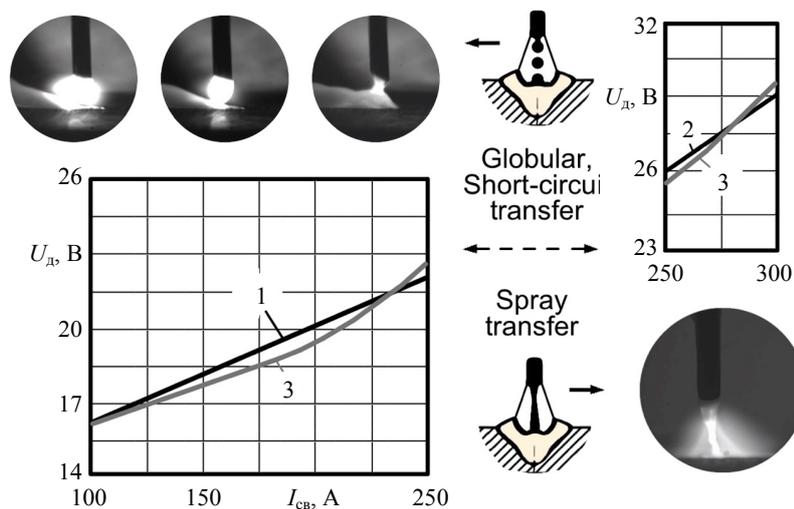


Рис. 4. Графическая зависимость наиболее эффективных значений напряжения на дуге от силы сварочного тока: 1 – сварка и наплавка в диапазоне переноса электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка (капельный) (формула (1)); 2 – то же в условиях струйного переноса электродного металла через дуговой промежуток (формула (2)); 3 – кривая по экспериментальным данным

Fig. 4. Graphical dependence of the most effective values of arc voltage on welding current strength:

1 – welding and depositing with electrode metal transfer by short circuits of arc gap (globular) (formula (1)); 2 – welding and depositing with spray transfer of electrode metal through the arc gap (formula (2)); 3 – experimental data curve

Предлагается использовать два типа зависимостей: для диапазона, соответствующего переносу электродного металла короткими замыканиями (капельный перенос) (уравнения (1), (2)), и для диапазона струйного переноса электродного металла (уравнения (3), (4)).

Анализ полученных результатов показывает некоторую нестабильность в области переходных процессов смены типа переноса электродного металла для значений силы тока 250 А в диапазоне напряжений 22–26 В. Данные режимы являются нежелательными и не рекомендуются для использования на практике.

На рис. 6 представлены экспериментальные графические зависимости коэффициента формы шва от напряжения на дуге при различной силе сварочного тока. Коэффициент формы шва определяет соотношение между шириной его валика и глубиной проплавления основного металла.

Чем это значение выше, тем более вероятно шов кристаллизуется в условиях практически параллельного роста первичных кристаллов литой структуры, что является неблагоприятным с точки зрения механических свойств получаемого соединения, особенно в случае швов и наплавок с большой площадью поперечного сечения.

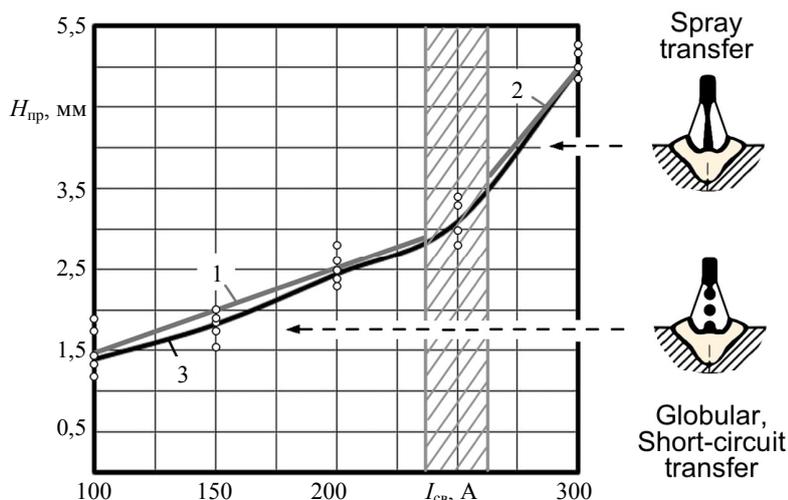


Рис. 5. Графическая зависимость глубины проплавления основного металла от силы сварочного тока при наиболее эффективных значениях напряжения на дуге: 1 – кривая в соответствии с формулой (3); 2 – то же в соответствии с (4); 3 – экспериментальная зависимость

Fig. 5. Graphical dependence of penetration depth of base metal on strength of welding current at the most effective values of arc voltage: 1 – curve according to formula (3); 2 – curve according to formula (4); 3 – experimental dependency

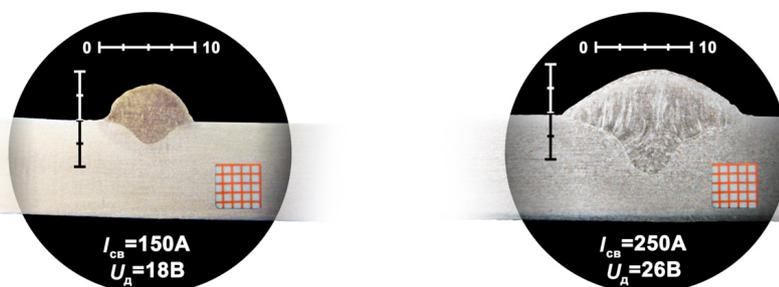
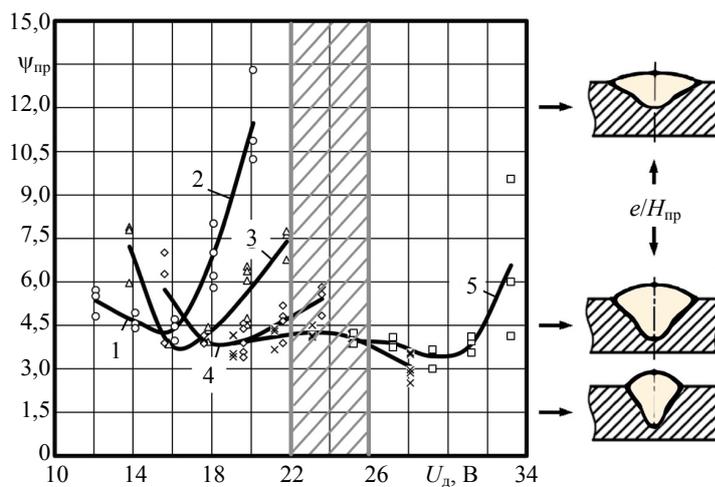


Рис. 6. Графические зависимости коэффициента формы шва ($\psi_{пр}$) от напряжения на дуге ($U_{д}$) при различном значении силы тока ($I_{св}$): 1 – $I_{св} = 100$ А; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 250; 5 – 300 А

Fig. 6. Graphical dependences of weld shape factor ($\psi_{пр}$) on arc voltage ($U_{д}$) at different current strength values ($I_{св}$): 1 – $I_{св} = 100$ А; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 250; 5 – 300 А

В случае малых значений шов будет более узкий, с переходом в так называемое «кинжальное» проплавление. При этом дендритная структура представляет собой встречный рост кристаллов, что может в некоторых случаях приводить к скоплению и сегрегации примесей легкоплавких эвтектик по плоскости, совпадающей с осью шва.

Анализ полученных результатов показал, что на наиболее эффективных соотношениях параметров режима (сила тока и напряжение на дуге) коэффициент формы шва находится в диапазоне 3–4 при всех значениях силы тока. Это свидетельствует о пропорциональном росте ширины наплавленного при увеличении глубины проплавления основного металла. Таким образом, форма шва достаточно стабильна и сохраняется преимущественно во всем диапазоне значений параметров режима.

В силу характера распределения теплоты при сварке в смесях на основе аргона наблюдаются ярко выраженное повышение глубины проплавления основного металла по оси шва и довольно пологие и широкие боковые части поперечного сечения валика. Это не позволяет снизить значение коэффициента формы менее 3, что свидетельствует о наличии некоторых проблем с выполнением швов в узкие щелевые разделки и с малыми углами скоса кромки. Характер проплавления в этом случае не позволяет получить относительно узкие швы с повышенной глубиной проплавления, так как увеличение силы тока с пропорциональным напряжением не позволяет принципиально изменить геометрическую форму проплавления.

Сказанное выше является объяснением необходимости выполнения разделок кромок с большими значениями угла скоса. В противном случае существенно повышается вероятность появления опасных дефектов в виде несплавлений по кромке и между отдельными валиками. Количество расплавленного металла при этом оказывается большим, чем потенциальная воронка углубления при расплавлении основного металла, и избыточный металл может натекает на боковые участки основного металла, не расплавляя их должным образом. Наличие физического контакта не подразумевает объемное химическое взаимодействие, что приводит к отсутствию прочных связей и появлению разупроч-

няющих зон, состоящих из сегрегационных примесей и оксидных поверхностных пленок, разрушающихся при внешнем нагружении.

ВЫВОДЫ

1. Технология дуговой сварки в защитных газовых смесях чувствительна к нарушению соотношений между силой тока и напряжением на дуге с точки зрения минимизации потерь электродного металла на разбрызгивание. Это требует переработки имеющейся на предприятиях документации при переходе на использование такой газовой среды взамен традиционно применяемого углекислого газа. В противном случае существует большая вероятность снижения эффективности такой замены, что может приводить к необоснованным потерям металла на разбрызгивание и нарушению процессов формирования шва.

2. Одна из наиболее вероятных причин образования несплавлений при сварке в среде 82 % Ar + 18 % CO₂ – невозможность снижения в нормальных условиях коэффициента формы шва ниже значений 3–4, что в случае применения разделок с малым углом скоса кромки (например, С17 по ГОСТ 14771–76), разработанных для сварки в среде CO₂, будет приводить к недостаточному их разогреву и проплавлению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фетисова, Е. А. Межваликовые несплавления при дуговой сварке в защитных газовых смесях на основе аргона / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2019. С. 171–172.*
2. Коротеев, А. О. Особенности выбора сварочных проволок при дуговой сварке в среде Ar + CO₂ с двухструйной коаксиальной подачей защитных газов в зону горения дуги / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко // *Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. 2017. № 3. С. 65–73.*
3. Коротеев, А. О. О возможности использования проволок с пониженным содержанием элементов раскислителей при механизированной сварке в среде Ar + CO₂ / А. О. Коротеев, В. П. Куликов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2012. Ч. 1. С. 187.*
4. Коротеев, А. О. Преимущества использования проволоки Св-08ГС в условиях механизированной сварки в смесях Ar + CO₂ / А. О. Коротеев // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности:*

- материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. С. 87.
- Коротеев, А. О. О возможностях и преимуществах применения проволоки Св-08ГС для механизированной сварки в газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ и в углекислом газе / А. О. Коротеев, В. О. Дербан // Материалы завод. науч.-техн. конф. «Металл 2012». Жлобин, 2012.
 - Коротеев, А. О. Особенности выбора сварочных материалов при сварке в защитных газовых смесях с двухструйной подачей газов в зону горения дуги / А. О. Коротеев, В. П. Долячко, В. П. Куликов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. С. 144–145
 - Коротеев, А. О. Исследование особенностей и оптимизация параметров режима сварки в среде Ar + CO₂ с целью разработки ресурсосберегающего технологического процесса производства каркаса автобуса МАЗ / А. О. Коротеев // Молодежь. Наука. Будущее: технологии и проекты: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. Казань, 2011. С. 297–300.
 - Коротеев, А. О. Разработка ресурсосберегающей технологии дуговой сварки высокопрочных сталей с использованием отечественных сварочных материалов / А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. С. 9–15.
 - Kah, P. Influence of Shielding Gases in the Welding of Metals / P. Kah, J. Martikainen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 64, No 9–12. P. 1411–1421. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>.
 - Sato, T. Influence of Shielding Gases on Quality and Efficiency in Gas Shielded Arc Welding / T. Sato // Welding International. 2001. Vol. 15, No 8. P. 616–619. <https://doi.org/10.1080/09507110109549413>.
- Поступила 20.04.2023
Подписана к печати 21.06.2023
Опубликована онлайн 31.07.2023
- REFERENCES
- Fetisova E. A. Koroteev A. O., Kulikov V. P. (2019) Interbead Non-Fusion During Arc Welding Gas Mixtures Based on Argon. *Materialy, Oborudovanie i Resursosberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of International of Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 171–172 (in Russian).
 - Koroteev A. O., Kulikov V. P., Dolyachko V. P. (2017) Specific Features of the Choice of Welding Wires During Arc Welding in Ar + CO₂ Environment with Two-Jet Coaxial Supply of Shielding Gases to the Arc Burning Zone. *Vestnik Belarussko-Rossiiskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (3), 65–73 (in Russian).
 - Koroteev A. O. Kulikov V. P. (2012) On Possibility of Using Wires with Reduced Content of Deoxidizing Elements in Mechanized Welding in Ar + CO₂ Medium. *Materialy, Oborudovanie i Resursosberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Ch. 2* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of International of Scientific and Technical Conference. Part 2]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 187 (in Russian).
 - Koroteev A. O. (2012) Advantages of Using Wire Св-08ГС (Sv-08GS) in Conditions of Mechanized Welding in Ar + CO₂ Mixtures. *Novye Materialy, Oborudovanie i Tekhnologii v Promyshlennosti: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Molodykh Uchenykh* [New Materials, Equipment and Technologies in Industry: Proceedings of International of Scientific and Technical Conference of Young Scientists]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 87 (in Russian).
 - Koroteev A. O., Derband V. O. (2012) On The Possibilities And advantages of Using Wire Св-08ГС (Sv-08GS) for Mechanized Welding in a Gas Mixture of 82 % Ar + 18 % CO₂ and in Carbon Dioxide. *Materialy Zavodskoi Nauch.-Tekhn. Konf. "Metall 2012"* [Proceedings of Plant of Scientific and Technical Conference "Metal 2012"]. Zhlobin (in Russian).
 - Koroteev A. O., Dolyachko V. P., Kulikov V. P. (2017) Specific Features of the Choice of Welding Consumables when Welding in Protective Gas Mixtures with Two-Jet Gas Supply to the Arc Burning Zone. *Materialy, Oborudovanie i Resursosberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of International of Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 144–145 (in Russian).
 - Koroteev A. O. (2011) Study of the Specific Features and Optimization of the Parameters of the Welding Mode in the Ar + CO₂ Environment in Order to Develop a Resource-saving Technological Process for the Production of the MAZ [Minsk Automobile Plant] Bus Frame. *Molodezh'. Nauka. Budushchee: Tekhnologii i Proekty: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. Molodykh Uchenykh i Spetsialistov* [Youth. Science. Future: Technologies and Projects: Proceedings of International of Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists]. Kazan, 297–300 (in Russian).
 - Koroteev A. O. (2014) Development of a Resource-Saving Technology for Arc Welding of High-Strength Steels Using Domestic Welding Consumables. *Novye Materialy, Oborudovanie i Tekhnologii v Promyshlennosti: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Molodykh Uchenykh* [New Materials, Equipment and Technologies in Industry: Proceedings of International of Scientific and Technical Conference of Young Scientists]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 9–15 (in Russian).
 - Kah P., Martikainen J. (2013) Influence of Shielding Gases in the Welding of Metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64 (9–12), 1411–1421. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>.
 - Sato T. (2001) Influence of Shielding Gases on Quality and Efficiency in Gas Shielded Arc Welding. *Welding International*, 15 (8), 616–619. <https://doi.org/10.1080/09507110109549413>.
- Received: 20.04.2023
Accepted: 21.06.2023
Published online: 31.07.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-278-285>

УДК 666.972; 693.54

Защитная способность цементного бетона с полифункциональной добавкой по отношению к стальной арматуре

Канд. техн. наук, доц. Н. С. Гуриненко¹⁾,
докт. техн. наук, проф. Э. И. Батяновский¹⁾

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

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

Реферат. В статье приведены результаты исследований влияния компонентов комплексной полифункциональной добавки на защитную способность бетона по отношению к стальной арматуре железобетонных строительных конструкций. В соответствии с современными тенденциями применения химических добавок в бетон с целью комплексного воздействия как на процессы твердения и формирования его структуры, так и на конечные физико-механические и эксплуатационные свойства бетона рассматриваемая добавка состоит из ряда компонентов. В ее состав входят пластифицирующий, ускоряющий твердение и уплотняющий структуру твердеющего бетона компоненты, а также аморфный ультрадисперсный микрокремнезем. Наличие последнего сопровождается реакцией с гидроксидом кальция и переводом ее в связанное состояние в твердеющем бетоне, что создает предпосылки к понижению щелочности (рН-фактора) в его объеме и соответственно создает опасность коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций. С учетом данного обстоятельства были выполнены исследования с целью установления степени влияния присутствующего в составе добавки аморфного ультрадисперсного микрокремнезема на свойства бетона, включая оценку его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, а также изменение прочности с течением времени (в настоящей статье до «возраста» бетона в три года от момента изготовления образцов составов без химических добавок и с введением комплексной полифункциональной добавки). В результате выявили повышение плотности, прочности бетона и его эксплуатационных свойств, в том числе защитную способность по отношению к стальной арматуре, за счет комплексного воздействия компонентов добавки, включая снижение начального водосодержания, повышение плотности цементного камня и переходных зон его контакта с поверхностью зерен заполнителя в бетоне.

Ключевые слова: полифункциональная добавка, микрокремнезем, ультрадисперсный микрокремнезем, цементный бетон, плотность, непроницаемость, арматура, защитная способность

Для цитирования: Гуриненко, Н. С. Защитная способность цементного бетона с полифункциональной добавкой по отношению к стальной арматуре / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 278–285. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-278-285>

Protective Ability of Cement Concrete with Polyfunctional Additive in Relation to Steel Reinforcement

N. S. Gurinenko¹⁾, E. I. Batyanovskiy¹⁾

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

Abstract. The paper presents the results of studies of the influence of the components of a complex polyfunctional additive on the protective ability of concrete in relation to steel reinforcement of reinforced concrete building structures. In accordance with modern trends in the use of chemical additives in concrete with the aim of a complex effect both on the processes

Адрес для переписки
Батяновский Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
bat47@mail.ru

Address for correspondence
Batyanovskiy Eduard I.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-73
bat47@mail.ru

of hardening and the formation of its structure, and on the final physical, mechanical and operational properties of concrete, the additive in question consists of a number of components. It consists of a plasticizing component, accelerating hardening and compacting the structure of hardening concrete, as well as amorphous ultrafine microsilica. The presence of the latter is accompanied by a reaction with calcium hydroxide and its transfer to a bound state in hardening concrete, which creates prerequisites for a decrease in alkalinity (pH factor) in its volume and, accordingly, can create a risk of corrosion of steel reinforcement of reinforced concrete structures. Taking into account this circumstance, studies have been carried out in order to establish the degree of influence of the amorphous ultrafine microsilica present in the composition of the additive on the properties of concrete, including an assessment of its protective properties in relation to steel reinforcement, as well as a change in strength over time (in this paper up to the "age" of concrete in three years from the moment of manufacture of samples of compositions without chemical additives and with the introduction of a complex polyfunctional additive). As a result, an increase in the density, strength of concrete and its operational properties, including the protective ability in relation to steel reinforcement, due to the complex effect of the additive components, has been revealed, including a decrease in the initial water content and an increase in the density of the cement stone and transition zones of its contact with the surface of the aggregate grains in concrete.

Keywords: polyfunctional additive, microsilica, ultradispersed microsilica, cement concrete, density, impermeability, reinforcement, protective ability

For citation: Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. (2023) Protective Ability of Cement Concrete with Polyfunctional Additive in Relation to Steel Reinforcement. *Science and Technique*. 22 (4), 278–285. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-278-285> (in Russian)

Введение. В современных условиях, несмотря на возросшее качество и наличие широкого выбора добавок в бетон, характеризующихся мононаправленным действием, во все больших объемах и с большей эффективностью используются добавки полифункционального действия. При этом наибольший эффект достигается сочетанием химических высокоэффективных пластифицирующих и ускоряющих твердение веществ с высокодисперсной минеральной составляющей – микрокремнеземом. Однако при использовании в комплексных добавках традиционного микрокремнезема его количество достигает 10 % от массы цемента, а в вариантах замены на иные, содержащие аморфный кремнезем вещества – еще больше [1–3], что создает неудобства при введении в состав бетона таких добавок и ограничивает их применение. В разработанной авторами комплексной полифункциональной добавке в бетон [4–6] в ее состав кремнеземистый компонент введен в виде ультрадисперсного (удельная поверхность составляет $S_{уд} \sim 350 \text{ м}^2/\text{г}$) микрокремнезема. Экспериментально доказано [5, 6], что за счет многократно более высокой удельной поверхности данная разновидность микрокремнезема в дозировке 0,75–1,0 % от массы цемента обеспечивает эффект, равный введению в бетон 10 % традиционного микрокремнезема. С учетом общепризнанного «механизма» действия аморфного микрокремнезема в цементном бетоне, базирующегося на реакции его с гидроокисью кальция и образовании нерастворимых кристаллогидратов силикатов кальция, что уплотняет и упрочняет структуру бетона, появляется опасность критического понижения pH-фактора жидкости, заполняющей

его поровое пространство. То есть одновременно с преимуществами, которые обеспечивают эти добавки, существует вероятность, что их введение в состав может привести к снижению защитной способности бетона по отношению к стальной арматуре. Результаты оценки такого влияния предложенной добавки на бетон приведены в материале настоящей статьи.

Материалы для исследований. В исследованиях использовали материалы: портландцемент марки ПЦ 500 по ГОСТ 10178, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБ EN 197-1–2015 и ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108–2020; компоненты полифункциональной добавки: ускоритель твердения – сульфат натрия (СН; Na_2SO_4) по ГОСТ 21458–75 и уплотняющий структуру цементного камня (бетона) – сульфат алюминия (СА; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) по ГОСТ 12966–85; заполнители для бетона – щебень гранитный традиционный фракций 5–10 и 5–20 мм (ГОСТ 8267–93); песок природный Мк ~2,6–2,8 (ГОСТ 8736–93); в качестве активного минерального компонента добавки использовали традиционный микрокремнезем (МК) марки МК-85, соответствующий требованиями СТБ EN 197-1–2015 и ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК), соответствующий ТУ 2168-002-14344269–09, характеризующийся большей удельной поверхностью за счет малых размеров частиц аморфного SiO_2 , а значит, и большим «реакционным» потенциалом. Это подтверждают данные сравнительного гранулометрического анализа дисперсности традиционного микрокремнезема (рис. 1а) и УДМК (рис. 1б), полученные с помощью прибора для измерения дисперсности твердофазных материалов Analysette 22, Nano Tec (Fritsch).

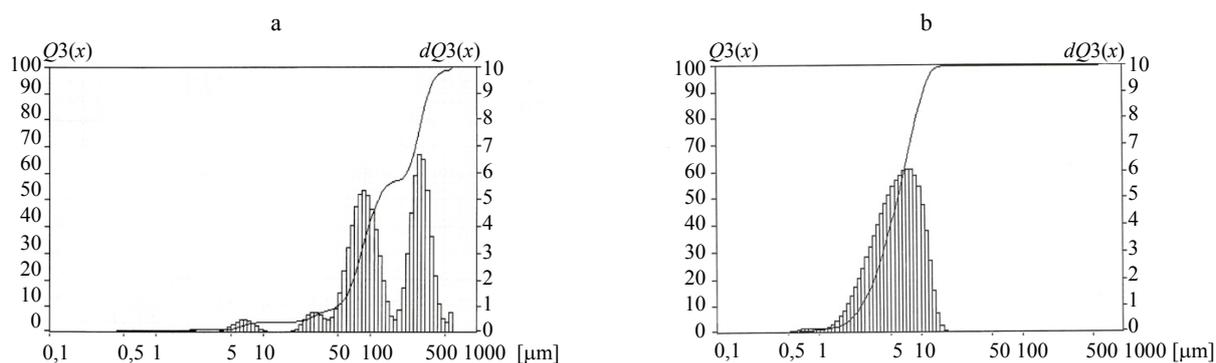


Рис. 1. а – гранулометрический состав микрокремнезема;
 б – гранулометрический состав ультрадисперсного микрокремнезема

Fig. 1. a – granulometric composition of microsilica; b – granulometric composition of ultrafine microsilica

В качестве пластификаторов использовали «Стахемент 2000-М Ж 30» (Пл), выпускаемый по ТУ ВУ 800013176.004–2011; С-3 (ТУ 5745-001-97474489–2007) и «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 190679156.002–2013), которые согласно СТБ 1112–98 относятся к пластифицирующим добавкам I группы.

Целью исследований было выявление влияния комплексной полифункциональной добавки [4], характеризующейся пластифицирующим и ускоряющим твердение цемента действием, на свойства бетона, включая его защитную способность по отношению к стальной арматуре.

Пуццолановая активность кремнезема и рН-фактор. Представленная полифункциональная добавка в бетон, содержащая ускоряюще-уплотняющий компонент (СН + СА), ультрадисперсный микрокремнезем и суперпластификатор на основе поликарбоксилатных смол, за счет их совокупного действия обеспечивает повышение темпа роста и уровня прочности бетона. При этом в обеспечении эффективности каждый компонент играет свою роль. Так, ультрадисперсный микрокремнезем способствует уплотнению структуры контактной переходной зоны [7, 8] за счет реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В результате снижается ее пористость, возрастает качество (сила) сцепления цементного камня с заполнителем в бетоне и арматурой в железобетоне. Одновременно тонкодисперсные частицы микрокремнезема выступают в роли «центров кристаллизации» [9] при формировании кристаллогидратной структуры в твердеющем цементном камне, что сопровождается ростом темпа набора и уровнем прочности затверде-

шего бетона. Решая задачу по всесторонней оценке влияния УДМК на процесс твердения и свойства бетона, были проведены исследования его пуццолановой активности в сравнении с другими используемыми в бетоне добавками, содержащими аморфный кремнезем. Результаты экспериментов, отраженные графическими зависимостями рис. 2, получены по методике «Бутта–Тимашева» [10], которая базируется на способности минеральных добавок, содержащих активный (аморфный) кремнезем, «поглощать» известь из известкового раствора.

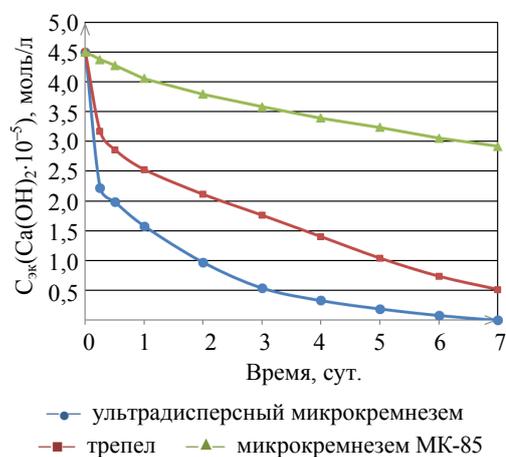


Рис. 2. Пуццолановая активность ряда веществ, содержащих аморфный кремнезем

Fig. 2. Pozzolanic activity of a number of substances containing amorphous silica

Очевидно, что пуццолановая активность ультрадисперсного микрокремнезема существенно превышает таковую для традиционного микрокремнезема. В этой связи, несмотря на то обстоятельство, что рекомендуемая дозиров-

ка в бетон УДМК в исследуемой добавке не превышает 1 % по массе цемента, следовало оценить его влияние на изменения уровня щелочности цементного камня и затвердевшего бетона, так как существует опасность критического снижения уровня щелочности (рН-фактор) бетона и, как следствие, развития коррозии арматуры с течением времени, что может привести к снижению несущей способности железобетонных строительных конструкций.

На начальном этапе исследований с учетом того, что, как отмечалось, введение аморфного кремнезема в цементный бетон способствует связыванию гидроокиси кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в нерастворимые гидросиликаты кальция и тем самым возможно понижение уровня щелочности среды в бетоне, провели соответствующую оценку влияния УДМК на этот показатель, используя методику его определения на водных вытяжках, полученных из образцов цементного камня. С этой целью готовили цементное тесто нормальной густоты без добавок и с добавками, вид и дозировка которых приведены в табл. 1, как и результаты экспериментального определения значений рН-фактора. Разновидности добавок, вводимых в цементное тесто, являются компонентами комплексной полифункциональной добавки. Дозировки добавок приведены в % по сухому веществу от массы цемента.

Измерения проводили с помощью портативного рН-метра марки HI 83141, а полученные результаты сведены в табл. 1.

Сопоставление данных за весь оцененный период твердения по всем составам цементного теста и затвердевшего цементного камня свидетельствует о незначительном снижении значительного рН-фактора под влиянием веществ вводимых добавок. При стабилизации его величин, например после 20 сут. твердения, для камня без добавок и с введением комплексной добавки относительное снижение составляет: $((12,7-12,5) / 12,7) \cdot 100 \sim 1,6 \%$, т. е. незначительную величину. В особой мере, если учесть, что оптимальная дозировка в бетон комплексной добавки составляет $\leq 1,0 \%$ по сухому веществу по массе цемента [6].

Считается [11], что минимально необходимый уровень щелочности, предотвращающий развитие процесса коррозии стальной арматуры в бетоне, должен характеризоваться величиной $\text{pH} \geq 11,8$ ед. Очевидно, что, как входящие в состав комплексной добавки ее компоненты, так и исследуемое вещество УДМК не критически снижают рН-фактор в цементном камне и, соответственно, при использовании в железобетоне комплексной добавки не потребуются дополнительной защиты стальной арматуры.

Таблица 1

рН водных вытяжек образцов цементного камня
pH of water extracts of cement stone samples

Время твердения	Без добавок	0,5 % Ст	0,5 % Ст + 10 % МК	0,5 % Ст + 1 % УДМК	0,5 % Ст + 1,5 % УДМК	0,5 % Ст + 1 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА
1 мин	12,40	12,30	12,30	12,30	12,30	12,30
2 мин	12,40	12,40	12,30	12,30	12,30	12,30
10 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
30 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
60 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
2 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
10 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
20 сут.	12,70	12,71	12,69	12,65	12,63	12,55
30 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50
60 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50

Оценка защитной способности бетона.

Защитную способность бетона по отношению к стальной арматуре путем электрохимических испытаний оценили на сериях образцов по направлению 2 по СТБ 1168–99 [12]. Эта методика позволяет определить способность бетона противостоять агрессивному внешнему воздействию раствора соли (NaCl) при циклическом насыщении – высушивании образцов. Повторение циклов сопровождается диффузией хлоридов через защитный слой бетона к заделанному в нем стальному стержню. Эффективность защиты предопределяется плотностью и непроницаемостью структуры бетона, уровнем щелочности жидкости в его поровом пространстве и толщиной защитного слоя. Для иницирования процесса диффузии иона-окислителя (Cl⁻) сквозь бетон и для оценки защитной способности бетона (кроме указанных циклических воздействий) к заделанному в бетон стальному (имитирующему арматуру) стержню прикладывают потенциал с отрицательным знаком, переводя его к положительному знаку в процессе испытаний. Оценку коррозионного состояния стали производят построением анодной поляризационной кривой по изменению плотности тока во взаимосвязи с изменением приложенного к ней потенциала. Базовым по оценке по данному методу является положительный потенциал в $E = 300$ мВ, для которого определяется плотность тока (i , мкА/см²) на поверхности стального элемента. Ее значение устанавливают проецированием на ось y точки пересечения построенной анодной поляризационной кривой, полученной в процессе испытаний образца, с проекцией потенциала в 300 мВ, значения которого откладывают на оси x .

На рис. 3а приведены примеры оценки коррозионного состояния стали образцов бетона

без добавки, на рис. 3б – с полифункциональной добавкой в виде экспериментально зафиксированной прибором анодной поляризационной кривой, отражающей изменение плотности тока (i , мкА/см²) в зависимости от изменения потенциала, приложенного к стальной арматуре (стальной стержень Ø 10 мм в геометрическом центре образца-балки размерами 70×70×100 мм), E , мВ, после 10 циклов насыщения в 5%-ом растворе NaCl – высушивания, в соответствии с положениями методики СТБ 1168–99 [12].

Экспериментальные данные, отраженные зависимостями рис. 3, получены при испытаниях образцов, бетон которых соответствует составу 1 (заводской без добавок; класс по прочности на сжатие С 25/30) и 3 (с оцениваемой добавкой), приведенным в табл. 2. При этом состав 3 с полифункциональной добавкой характеризовался сниженным на ~10% расходом цемента. Состав 2 принят для сравнения при оценке свойств бетона и характеризовался наличием комплексной добавки, но в составе которой отсутствовал УДМК.

Анализ зависимостей рис. 3а и 3б показывает, что, несмотря на существенное снижение содержания цемента в бетоне и наличие в комплексной добавке аморфного кремнезема, его защитная способность по отношению к стальной арматуре значительно выше, чем обеспечиваемая (в условиях, выполненных по СТБ 1168–99 [12] определений) исходным заводским составом. Так, если для последнего плотность тока при $E = 300$ мВ составила ~4,4 мкА/см², то для состава бетона с добавкой ~3,0 мкА/см². Эти данные отражают рост защитной способности бетона с добавкой за счет повышения его плотности и непроницаемости, так как эксперименты в остальном выполнены с соблюдением правила «прочих равных условий».

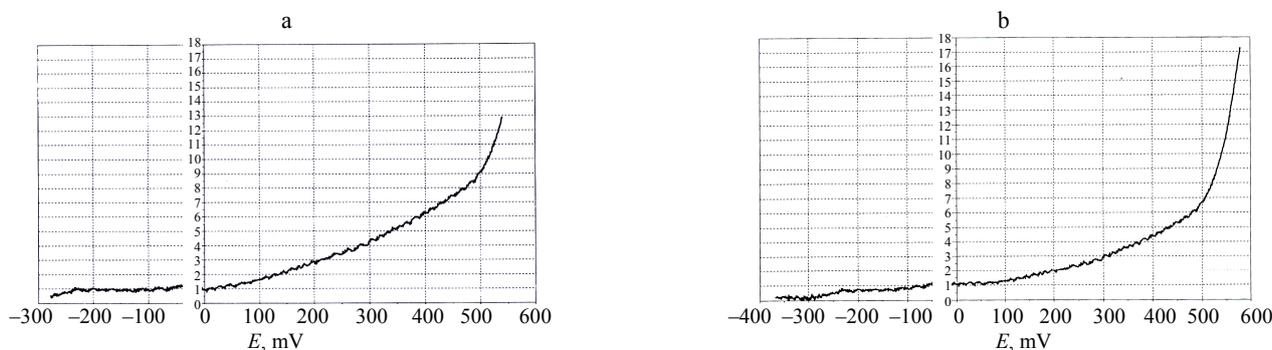


Рис. 3. Анодная поляризационная кривая образцов бетона после 10 циклов насыщения (в 5%-м растворе NaCl) – высушивания: а – без добавки; б – с полифункциональной добавкой

Fig. 3. Anode polarization curve of concrete samples after 10 saturation cycles (in 5% NaCl solution) – drying: a – without additive; b – with multifunctional additive

Таблица 2

**Составы бетона (номинальный класс по прочности на сжатие С 25/30 (В30))
и характеристики бетонной смеси**

**Concrete compositions (nominal compressive strength class C 25/30 (B30))
and characteristics of concrete mixture**

Состав бетона	Расход составляющих, кг/м ³ , бетонной смеси					Характеристика бетонной смеси		
	Цемент	Песок	Щебень	Химическая добавка, % и кг	Вода (с учетом $W_{П}$ и $W_{Щ}$)	(В/Ц) _б	Средняя плотность, кг/м ³	ОК, см
1 (заводской без добавок)	444	690	1100	–	195	0,44	2430	5,5
2 (с комплексной добавкой без УДМК)	433	795	1150	0,5 % СН + 0,25 % СА + + 0,25 % Пл (0,95 % от МЦ; 4,1 кг)	147	0,34	2530	5,0
3 (с полифункциональной добавкой с УДМК)	400	860	1150	0,35 % СН + 0,15 % СА + + 0,25 % Пл + 0,25 % УДМК (1,0 % от МЦ; 4,0 кг)	136	0,34	2540	6,0

Таблица 3

**Свойства бетона
Concrete properties**

№ состава по табл. 2	Водопоглощение, % мас.	Марка по водонепроницаемости	Марка по морозостойкости	Защитная способность (i , мкА/см ² , при $E = 300$ мВ)	Прочность на сжатие* после тепловой обработки, МПа	Прочность на сжатие* при НВУ, МПа, в возрасте	
						28 сут.	трех лет
1	4,8	W4	F300	4,4	35,0	63,2	71,9
2	3,9	W6	F400–F500	4,0	53,6	69,2	75,4
3	3,5	W8	F500	3,0	53,5	71,2	78,2

* Прочность бетона на сжатие приведена к базовому размеру образцов-кубов с ребром 150 мм.

Следует отметить, что для всех приведенных в табл. 2 вариантов составов бетона, включая состав 1 (заводской), экспериментально подтверждено, что они в полной мере обеспечивают защитную способность по отношению к стальной арматуре. Во всех случаях плотность тока при $E = 300$ мВ была ниже $i = 5,0$ мкА/см², что по СТБ 1168–99 [12] обеспечивает пассивное (без признаков коррозии) состояние в бетоне стальной арматуры, включая преднапряженную. Таким образом, возросшая в бетоне с добавкой защитная способность по отношению к стальной арматуре ($i \sim 3,0$ мкА/см² при $E = 300$ мВ) гарантированно обеспечивает возможность ее использования в преднапряженных железобетонных конструкциях при внешней агрессии эксплуатационной среды, так как по СТБ 1168–99 [12] плотность тока в этом случае не должна превышать 5,0 мкА/см².

Результаты производственной апробации и свойства бетона. На предприятии «Комбинат железобетонных изделий и конструкций» ОАО «Оршанский строительный трест № 18»

(г. Орша) осуществлена производственная апробация результатов исследований, в процессе которой оценили эффективность использования полифункциональной добавки [4], при изготовлении плит преднапряженных дорожно-настила (ПДН) и других изготавливаемых изделий. В табл. 2 представлены составы бетона, примененные при изготовлении плит ПДН. В табл. 3 приведены данные о прочности (на сжатие) и ряде эксплуатационных свойств бетона, установленные как в процессе производственной апробации, так и при сопровождающих ее реализацию лабораторных исследованиях, выполненных в заводской лаборатории и БНТУ.

Условия твердения бетона при тепловлажностной обработке соответствовали практиковавшимся на момент производственных исследований на предприятии с прогревом образцов бетона и изделий в ямной камере по режиму: предварительная выдержка 11 ч (с 13:00 до 24:00); подача пара с 24:00 до 2:00 (2 ч с нагревом среды до 50–60 °С); выдержка в ка-

мере 5,5 ч (до 7:00) и остывание образцов до распалубки и испытаний 4 ч (испытания в 10:00–11:00); последующее твердение образцов бетона при определении прочности – нормально-влажностные условия ($t \sim 20 \pm 3$ °С; $\phi \geq 90$ %) до возраста 28 сут. и трех лет включительно.

Водопоглощение по массе, водонепроницаемость и морозостойкость определены по действующей нормативно-технической документации [13–15].

Результаты экспериментальной оценки изменений водопоглощения, водонепроницаемости и морозостойкости бетона без добавок и с введением в его состав комплексной (без УДМК) и полифункциональной (содержащей УДМК) добавок одновременно отражают причинно-следственную связь роста защитной способности бетона состава 3. Несмотря на уменьшение на ~10 % содержания в нем цемента, в сравнении с составами 1 и 2 свойства бетона, характеризующие его непроницаемость, существенно возрастают, а на этой основе повышается и защитная способность бетона по отношению к стальной арматуре. Наличие в комплексной полифункциональной добавке реакционно-способного аморфного кремнезема, что, как мы считаем, способствует уплотнению зон контакта поверхности зерен заполнителей с цементным камнем в бетоне, обеспечивает этот эффект. Данный вывод подтверждает сопоставление результатов оценки всей (приведена в табл. 3) совокупности свойств бетона составов 2 (добавка без УДМК) и 3 (содержащая УДМК и компоненты-аналоги; табл. 2).

Прочность бетона после тепловой обработки по практиковавшемуся на момент апробации заводскому режиму составила ~55 % от ее уровня в проектном 28-суточном возрасте для бетона без добавок и ≥ 75 % для бетона с добавками. К проектному возрасту прирост прочности бетона с комплексом без УДМК составил ~9 % и с УДМК ~13 %, несмотря на то что расход цемента в последнем случае был снижен относительно бетона без добавок (состав 1) на ~10 %, а по сравнению с составом 2 на ~8 %. Причиной роста как относительной прочности, так и ее абсолютных значений при сравнении данных по составам 2 и 3 является рост плотности и прочности переходных зон контакта зерен заполнителя с цементным камнем за счет реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [7, 8] с активным кремнеземом и образованием кристаллогидратных новообразований силикатной группы. Результирующим

эффектом являются упрочнение сил сцепления поверхности заполнителя с цементным камнем и рост прочности бетона, а также его непроницаемости как основы повышения эксплуатационных свойств.

Оценка изменений прочности образцов бетона за три года (условия хранения нормально-влажностные) подтверждает вывод И. Н. Ахвердова – М. А. Шалимо [16, 17] о наличии закономерной связи между формированием плотности структуры цементного камня и бетона в целом на начальном этапе ее становления и последующим ростом прочности с течением времени. Очевидно, что сопоставление данных как по всем трем составам, так и особенно по составам 2 и 3 подтверждает эту закономерность. В частности, для бетона составов 2 и 3 при практическом равенстве водоцементного отношения (т. е. одинаковой пористости цементного камня) и консистенции смеси по подвижности, но при повышении плотности структуры бетона состава 3 за счет введения аморфного SiO_2 с течением времени в большей мере растет и его прочность. Совокупно с этим обеспечивается рост эксплуатационных свойств бетона, включая защитную способность по отношению к стальной арматуре железобетонных строительных конструкций.

ВЫВОДЫ

1. Введение в состав тяжелого конструкционного бетона комплексной полифункциональной добавки, содержащей ультрадисперсный микрокремнезем в активной аморфной форме, не снижает его защитную способность по отношению к стальной арматуре, включая вариант применения добавки в бетоне для изделий (конструкций) с преднапряжением арматуры.

2. За счет комплексного воздействия компонентов добавки, включая снижение начального водосодержания и повышение плотности цементного камня и переходных зон его контакта с поверхностью зерен заполнителя, обеспечивается рост плотности, прочности бетона и его эксплуатационных свойств, в том числе защитной способности по отношению к стальной арматуре.

3. Оценка прочности бетона, приготовленного без и с наличием добавок, в 3-летнем возрасте показала стабильный рост ее величины, базирующийся на повышении плотности бетона за счет использования в его составе комплексной полифункциональной добавки, содержащей ультрадисперсный микрокремнезем.

ЛИТЕРАТУРА

- Каприелов, С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С. С. Каприелов // Бетон и железобетон. 1995. № 4. С. 16–20.
- Каприелов, С. С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С. С. Каприелов, В. Г. Батраков, А. В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6–10.
- Модификатор бетона Эмбэлит. Технические условия: ТУ 5870-176-46854090-04. – Введ. 02.03.2004. М.: Госстандарт, 2004. 27 с.
- Комплексная добавка для ускорения твердения и повышения прочности бетона: Евраз. пат. 035404 / Э. И. Батяновский, Н. С. Гуриненко. Опубл. 08.06.2020.
- Гуриненко, Н. С. Влияние полифункциональной добавки на процесс твердения и свойства цементного бетона / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 4. С. 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-330-338>.
- Батяновский, Э. И. Бетон с полифункциональной кремнеземсодержащей добавкой / Э. И. Батяновский, Н. С. Гуриненко. Минск: БНТУ, 2021. 195 с.
- Wang, Jia. Investigation of structure and properties of the interfacial zone between lime aggregate and cement paste / Jia Wang // J. of Chin. Silicate Soc. 1987. Vol. 2. P. 114–121.
- Texture of calcium hydroxide near the cement paste-aggregate interface / R. J. Detwiler [et al.] // Cement a. Concrete Research. 1988. Vol. 18, № 5. P. 823–829. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90109-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90109-3).
- Рапинов, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Рапинов, Т. И. Розенберг. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 186 с.
- Бутт, Ю. М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. М.: Высш. шк., 1973. 503 с.
- Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]; под общ. ред. В. М. Москвина. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
- Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона = Бетоны. Метод контролю карозійного стану стальної арматури у бетоне і захисних властивостей бетону: СТБ 1168–99. Взамен СТ СЭВ 44-21–83; введ. 01.01.00. Минск: Минстройархитектуры, 1999. III, 20 с.
- Бетоны. Метод определения водопоглощения: ГОСТ 12730.3–78. Взамен ГОСТ 12730–67; введ. 01.01.80. М.: Стандартиформ, 2007. 4 с.
- Бетоны. Методы определения водонепроницаемости: ГОСТ 12730.5–84. Взамен ГОСТ 12730.5–78, ГОСТ 19426–74; введ. 01.07.85. М.: Стандартиформ, 2007. 12 с.
- Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования: ГОСТ 10060.0–95. Взамен ГОСТ 10060–87; введ. 01.04.97. Минск: Минстройархитектуры, 1997. 7 с.
- Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
- Ахвердов, И. Н. Ультразвуковое вибрирование в технологии бетона / И. Н. Ахвердов, М. А. Шалимо. М.: Стройиздат, 1969. 133 с.

REFERENCES

- Kaprielov S. S. (1995) General Patterns of Formation of the Structure of Cement Stone and Concrete with the Addition of Ultra-Dispersed Materials. *Beton i Zhelezobeton*, (4), 16–20 (in Russian).
- Kaprielov S. S., Batrakov V. G., Sheinfeld A. V. (1999) Modified Concrete of a New Generation: Reality and Perspective. *Beton i Zhelezobeton*, (6), 6–10 (in Russian).
- TU [Technic Specifications] 5870-176-46854090-04. *Concrete modifier Embelit. Specifications*. Moscow, Gosstandart Publ., 2004. 27 (in Russian).
- Batyanovsky E. I., Gurinenko N. S. (2020) *Complex Additive for Accelerating Hardening and Increasing the Strength of Concrete*: Eurasian Patent No 035404.
- Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. (2019) Influence of Polyfunctional Additive on Hardening Process and Properties of Cement Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 18 (4), 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-330-338> (in Russian).
- Batyanovskiy E. I., Gurinenko N. S. (2021) *Concrete with Polyfunctional Silica-Containing Additive*. Minsk, Belarusian National Technical University. 195 p. (in Russian).
- Wang Jia (1987) Investigation of Structure and Properties of the Interfacial Zone Between Lime Aggregate and Cement Paste. *J. of Chin. Silicate Soc.*, 2, 114–121.
- Detwiler R. J., Monteiro P. J. M., Wenk H.-R., Zhong Z. (1988) Texture of Calcium Hydroxide Near the Cement Paste-Aggregate Interface. *Cement a. Concrete Research*, 18 (5), 823–829. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90109-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90109-3).
- Ratinov V. B., Rozenberg T. I. (1989) *Additives in Concrete*. 2nd ed. Moscow: Stroyizdat Publ. 186 (in Russian).
- Butt, Yu. M., Timashev V. V. (1973) *Laboratory Manual on Chemical Technology of Binders*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 503 (in Russian).
- Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., Guzeev E. A. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of their Protection*. Moscow, Stroyizdat Publ. 536 (in Russian).
- STB [Standards of the Republic of Belarus] 1168–99. *Concrete. Method for Monitoring the Corrosion State of Steel Reinforcement in Concrete and the Protective Properties of Concrete*. Minsk, Publishing House “Minstroyarkhitektury”, 1999. 20 (in Russian).
- State Standard 12730.3–78. *Concrete. Method for Determining Water Absorption*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 4 (in Russian).
- State Standard 12730.5–84. *Concrete. Method for Determining Water Resistance*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 12 (in Russian).
- State Standard 10060.0–95. *Concrete. Method for Determining Frost Resistance. General Requirements*. Minsk, Publishing House “Minstroyarkhitektury”, 1997. 7 (in Russian).
- Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete physics*. Moscow, Stroyizdat Publ. 464 (in Russian).
- Akhverdov I. N., Shalimo M. A. (1969) *Ultrasonic Vibration in Concrete Technology*. Moscow, Stroyizdat Publ. 133 (in Russian).

Поступила 10.02.2023

Подписана к печати 11.04.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

Received: 10.02.2023

Accepted: 11.04.2023

Published online: 31.07.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293>

УДК 624. 131.552

Оценка эффективности применения горизонтальных инерционных барьеров для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде

Канд. техн. наук К. Э. Повколас¹⁾

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

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

Реферат. В статье приводятся расчеты колебаний грунтового массива при размещении на пути их распространения горизонтального инерционного барьера в виде прямоугольной бетонной плиты, заглубленной в грунт. Эффект демпфирования поверхностной волны при ее контакте с инерционной плитой связан с ее отражением, преломлением и частичным поглощением. Теоретические исследования проводили при помощи метода конечных элементов. Грунтовая среда рассматривалась как упругий инерционный массив, ограниченный неотражающими границами. Смоделированы различные варианты геометрии инерционной плиты и ее пространственного расположения на поверхности грунтовой среды между источником колебаний и рассматриваемой точкой за барьером. Эффективность каждого варианта виброизоляции количественно оценивали по величине, показывающей, во сколько раз уменьшается скорость вертикальных колебаний грунта за барьером по сравнению со свободным распространением поверхностных волн. Показано, что интенсивное снижение вертикальных перемещений происходит, начиная с боковой грани инерционной плиты. Здесь амплитуда вертикальных колебаний уменьшается в 9,8 раза для бетонной плиты длиной 15 м и в 4,2 раза для 3-метровой плиты. На расстоянии 22 м от точки приложения динамической нагрузки амплитуды уменьшаются в 5,48 и 2,95 раза соответственно для плит шириной 15 и 3 м. Данный способ снижения вибродинамических воздействий обладает простотой конструктивного исполнения и может быть использован в стесненных условиях городской застройки для защиты существующих и проектируемых зданий и сооружений.

Ключевые слова: вибрации, здания, сооружения, воздействия, инерционный барьер, скорость колебаний

Для цитирования: Повколас, К. Э. Оценка эффективности применения горизонтальных инерционных барьеров для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 286–293. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293>

Evaluation of Effectiveness of Application of Horizontal Inertial Barriers to Reduce Vibrations Propagating in Ground Environment

K. E. Povkolas

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

Abstract. The paper presents calculations of vibrations of the soil mass when a horizontal inertial barrier in the form of a rectangular concrete slab buried in the ground is placed on the propagation path of vibrations. The damping effect of a surface wave upon its contact with an inertial plate is associated with its reflection, refraction and partial absorption. Theoretical studies have been carried out using the finite element method. The ground medium has been considered as an elastic inertial array bounded by non-reflecting boundaries. Various variants of the geometry of the inertial plate and its spatial arrangement on the surface of the soil medium between the vibration source and the considered point behind the barrier are modeled. The effectiveness of each variant of vibration isolation has been quantified by the value showing how many times the speed of vertical oscillations of the ground behind the barrier decreases compared to the free propagation of surface waves.

Адрес для переписки

Повколас Константин Эдуардович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/1,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-77
K_Povkolas@mail.ru

Address for correspondence

Povkolas Konstantin E.
Belarusian National Technical University
65/1, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-77
K_Povkolas@mail.ru

It is shown that an intensive decrease in vertical displacements occurs starting from the side face of the inertial plate. Here, the amplitude of vertical oscillations decreases by 9,8 times for a concrete slab 15 m long, and by 4,2 times for a 3-meter slab. At a distance of 22 m from the point of application of the dynamic load, the amplitudes decrease by factors of 5.48 and 2.95, respectively, for slabs of 15 and 3 m width. This method of reducing vibro-dynamic effects has a simple design and can be used in cramped conditions of urban development to protect existing and planned buildings and structures.

Keywords: vibrations, buildings, structures, impacts, inertial barrier, vibration speed

For citation: Povkolas K. E. (2023) Evaluation of Effectiveness of Application of Horizontal Inertial Barriers to Reduce Vibrations Propagating in Ground Environment. *Science and Technique*. 22 (4), 286–293. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293> (in Russian)

Введение

Развитие промышленности и транспортной инфраструктуры сопровождается увеличением вибродинамических воздействий на конструкции зданий и сооружений, зачастую вызывая их повреждения. К примеру, согласно сведениям [1], вибрационное загрязнение городов в Республике Беларусь с 2002 по 2013 г. увеличилось до 1,5 раза: от метрополитена – на 41 %, автотранспорта – на 44, трамваев – на 21, промышленной вибрации – на 11 %. Можно предположить, что интенсивность вибродинамических воздействий в дальнейшем будет только нарастать. Этот факт подтверждают опытные данные, полученные автором [2]. Математическая модель определения физического состояния зданий и сооружений в целом в зависимости от уровня ускорений колебаний конструкций и продолжительности их действия получена И. А. Кудрявцевым [1]. Она нашла отражение в нормативном документе [3].

Основным фактором, определяющим повреждение строительных конструкций зданий или сооружений, при действии вибраций является дополнительная неравномерная динамическая осадка фундаментов [4, 5]. Динамические нагрузки от работы промышленного оборудования, при забивке свай и вибропогружении шпунтов, передаваемые через грунтовую среду и фундамент на строительные конструкции, редко приводят к повреждению строительных конструкций, находящихся в исправном состоянии, если отсутствуют дополнительные неравномерные динамические осадки. Методика их расчета приведена в разработанном автором нормативном документе [6].

Целью работы является расчетное обоснование эффективности способа виброизоляции зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде от точечных источников, путем устрой-

ства между источником и приемником колебаний горизонтального инерционного барьера в виде бетонной плиты. Для достижения поставленной цели решена следующая задача: выполнено численное 3D моделирование взаимодействия грунтовых волн с горизонтальным инерционным барьером при различных геометрических параметрах барьера и типах вибродинамических воздействий (импульсное и гармоническое вибрационное). Научная новизна работы заключается в оценке эффективности применения горизонтального барьера применительно к решению задач промышленной сейсмике (работе кузнечных молотов и штампов, машин с периодическими нагрузками) в части снижения вибрационных нагрузок на строительные конструкции прилегающих зданий и сооружений, инженерных коммуникаций.

Идея использовать горизонтальный кольцевой барьер вокруг застройки для защиты от сейсмических волн изложена в [7]. Она базируется на теореме П. Чандвика [8], согласно которой поверхностные волны, которые переносят большую часть сейсмической энергии, не могут распространяться, если поверхность полупространства заземлена. Это гипотеза была модифицирована [7, 9] в части размещения на поверхности грунта тонкого слоя с измененными физико-механическими свойствами. Практического применения в сейсмостойком строительстве она пока не нашла. В работе [9] на основании расчетов методом конечных элементов в плоской постановке сделан вывод об определяющем влиянии плотности, модуля упругости и геометрии барьера на эффективность его применения. С увеличением указанных параметров эффект демпфирования возрастает. В данной работе рассматривается возможность использования этого метода сейсмоизоляции применительно к промышленной сейсмике. В отличие от исследований [9] расчеты выпол-

нены в пространственной постановке с различными геометрическими параметрами барьера в виде бетонной плиты и частотным составом вынужденных колебаний от точечного источника на поверхности грунтового массива.

Результаты численного моделирования виброизоляции зданий и сооружений при помощи инерционных плит

С целью оценки эффективности данного способа виброзащиты зданий и сооружений от колебаний, распространяющихся в грунте, выполнен комплекс расчетов системы «источник колебаний – среда распространения – приемник колебаний» методом конечных элементов. Грунтовой массив моделировался как упругая инерционная среда с демпфированием колебаний по гипотезе Релея, поскольку амплитуда генерируемых колебаний мала и грунт не испытывает значительных пластических деформаций в грунтовой среде. Метод был верифицирован [2].

На рис. 1а приводится иллюстрация, поясняющая возможное применение барьера внутри производственного здания. Он может быть использован и вне здания для защиты от внешних колебаний. Расчетная конечно-элементная схема грунтового массива с расположенными на нем фундаментом под машину и инерционной плитой приводится на рис. 1б.

Расчетная схема (рис. 1б) представляет собой грунтовой массив размерами $50 \times 25 \times 19$ м, состоящий из 33040 конечных элементов, на

котором расположены бетонный фундамент мелкого заложения с размерами в плане $1,5 \times 1,5$ м и толщиной 1,0 м и инерционная плита, толщина T и ширина L которой варьировались. Длина барьера (размер, перпендикулярный направлению распространения продольной волны) принята равной 20 м. К центру фундамента прикладывали вертикально действующую динамическую нагрузку в виде синусоидального импульса, характерную для работы кузнечного молота с амплитудой 10 т продолжительностью $t = 0,01; 0,02; 0,04$ и $0,08$ с, а также в виде гармонического колебания 12,5; 25; 50 Гц. Рассматривался грунт с динамическим модулем упругости $E = 50$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$ и удельным весом 20 кН/м³. Расчет производится в ПК LIRA 10.8 с использованием расчетного комплекса «Динамика+». Время интегрирования 1 с. По результатам расчета выявлены зависимости перемещений, скорости и ускорения конструкций источника, инерционной плиты и поверхности грунта за ее пределами.

Изменения амплитуд вертикальных перемещений A с ростом расстояния от источника колебаний r при длительности импульса $t = 0,02$ с представлены на рис. 2а при различных длинах барьера L (размер барьера в направлении распространения продольной волны) и на рис. 2б при различных его толщинах T . Плиты располагаются начиная на расстоянии 5 м от точки приложения динамической нагрузки.

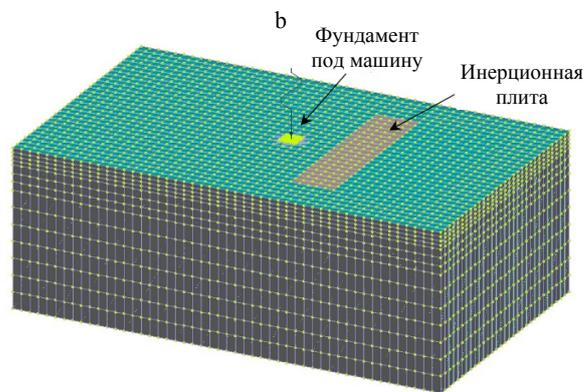
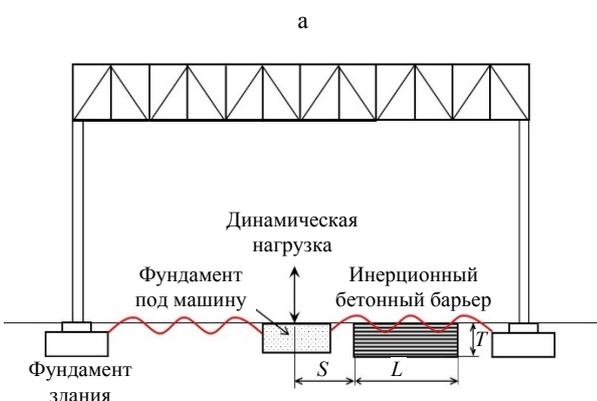


Рис. 1. Инерционный барьер для демпфирования колебаний, распространяющихся в грунте: а – схема возможного применения барьера; б – расчетная конечно-элементная схема

Fig. 1. Inertial barrier for damping vibrations propagating in the ground:

а – diagram of the possible application of the barrier; б – calculated finite element scheme

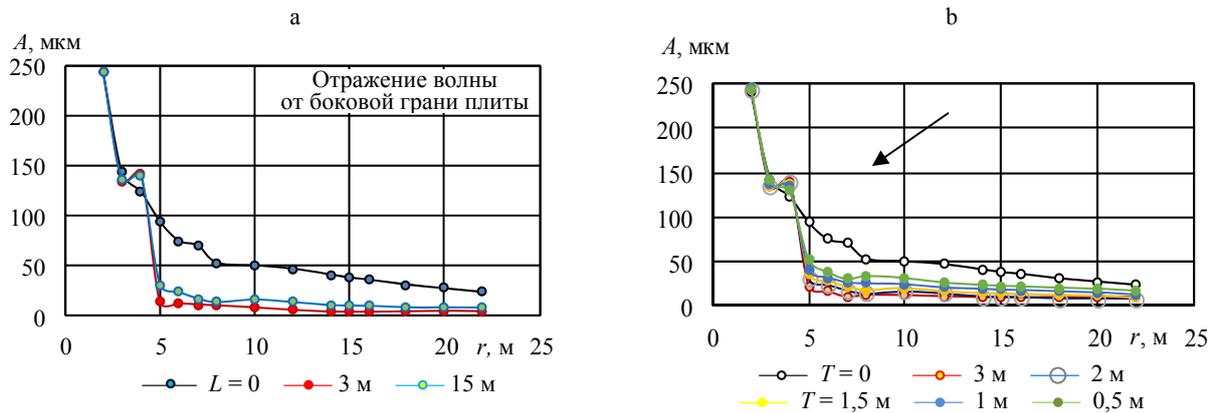


Рис. 2. Зависимость максимальной амплитуды A (мкм) колебаний от расстояния между источником и приемником колебаний r (м): а – при толщине бетонной плиты $T = 2$ м и длинах $L = 3$ и 15 м ($t = 0,02$ с), б – при различной толщине ($T = 3,0; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5$ м) бетонной плиты длиной $L = 3$ м

Fig. 2. Dependence of the maximum amplitude A (μm) of oscillations on the distance between the source and receiver of oscillations r (m): а – at a concrete slab thickness $T = 2$ m and lengths $L = 3$ and 15 m ($t = 0.02$ s), б – at various thicknesses ($T = 3.0; 2.0; 1.5; 1.0; 0.5$ m) of a concrete slab with a length $L = 3$ m

Из представленных данных следует, что интенсивное снижение вертикальных перемещений происходит начиная с боковой грани инерционной плиты. Здесь амплитуда вертикальных колебаний уменьшается в 9,8 раза для бетонной плиты длиной 15 м и в 4,2 раза для 3-метровой плиты. На расстоянии 22 м от точки приложения динамической нагрузки амплитуды уменьшаются в 5,48 и 2,95 раза соответственно для плит длиной 15 и 3 м. Перед инерционной плитой происходит увеличение величин вертикальных колебаний, связанное с отражением волн от ее боковой грани.

Зависимость максимальной амплитуды A (мкм) вертикальных колебаний на расстоянии $r = 22$ м от источника вибродинамических воздействий (ВДВ) при различной толщине ($T = 3,0; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5$ м) бетонных плит шириной $L = 3$ м с длиной импульса $t = 0,02$ с представлена на рис. 3.

Из приведенных на рис. 3 данных следует, что изменение как длины плиты L , так и ее толщины T приводит к значительному снижению амплитуды вертикальных колебаний. Причем в нашем случае наибольший эффект демпфирования проявляется при толщине $T = 2$ м. Поэтому в дальнейшем в расчетах принята эта величина.

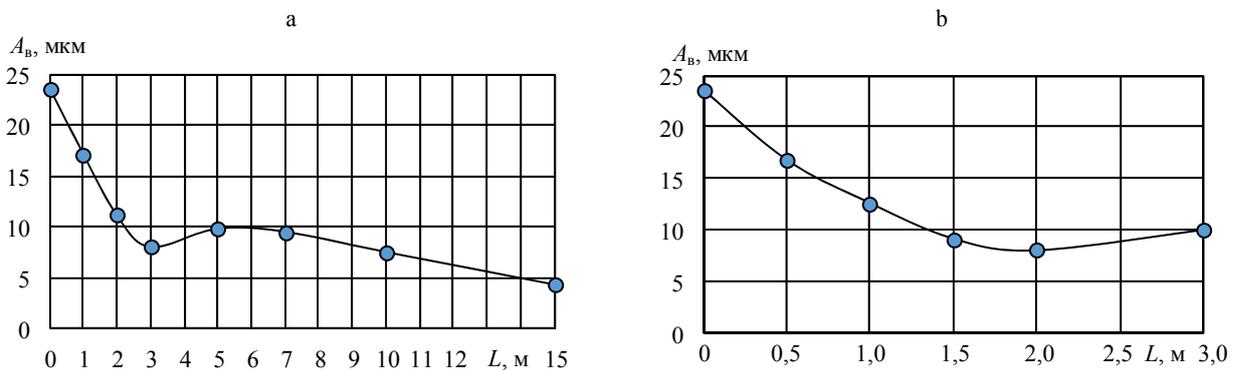


Рис. 3. Зависимость максимальной амплитуды A (мкм) колебаний на расстоянии 22 м от источника вибродинамических воздействий при различных длинах L (м) гравитационных бетонных плит при ее толщине $T = 2$ м (рис. 3а) и различных толщинах инерционных бетонных плит T при одинаковой длине $L = 3$ м (рис. 3б)

Fig. 3. Dependence of the maximum amplitude A (μm) of oscillations at a distance of 22 m from the source of vibrodynamical impacts at different lengths L (m) of gravitational concrete slabs with its thickness $T = 2$ m (Fig. 3a) and various thicknesses of inertial concrete slabs T with the same length $L = 3$ m (Fig. 3b)

Количественно передачу колебаний от грунта фундаменту можно охарактеризовать коэффициентом передачи колебаний K , определяемым по формуле

$$K = \frac{A_{f \max}}{A_{g \max}},$$

где $A_{f \max}$ – максимальное вертикальное перемещение фундамента по центру; $A_{g \max}$ – то же поверхности грунта при отсутствии фундамента.

Зависимости коэффициента передачи колебаний K от толщины гравитационных бетонных плит $T = 0,5; 1; 1,5; 2; 3$ м длиной $L = 3$ м и соответствующего статического давления по его подошве p , т/м^2 , приведены соответственно на рис. 4а и 4б.

Из представленных данных следует, что с увеличением толщины плиты и статического давления по ее подошве амплитуда колебаний значительно уменьшается. Игнорировать инерционность фундамента и вышележащих конструкций нельзя. Между тем в ряде ра-

бот [10–15] предполагается, что колебания фундамента и грунта перед ним равны. По данным [10], это предположение широко используется в практике расчетов на сейсмические воздействия. По мнению автора, это приводит к завышению динамических усилий, возникающих в наземных конструкциях и, как следствие, к увеличению расхода строительных материалов. Указанное предположение правомочно при небольших величинах статических давлений, передаваемых фундаментами на грунтовое основание.

Распределение максимальных вертикальных амплитуд перемещений A по глубине z на расстоянии 22 м от источника ВДВ при наличии фундамента и свободном их распространении показано на рис. 5.

Из приведенных данных следует, что амплитуда максимальных вертикальных колебаний фундамента значительно ниже (в 3,7 раза), чем при его отсутствии в той же точке. Искажение формы зависимости $A = f(z)$ происходит до глубины, равной $3L$, где L – ширина фундамента.

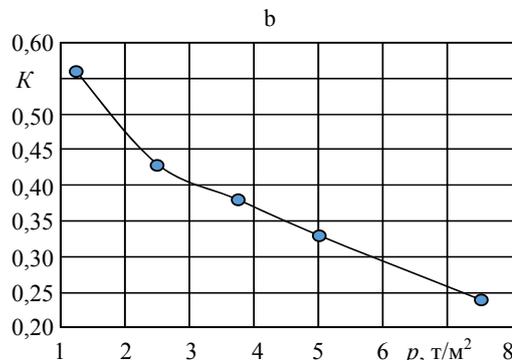
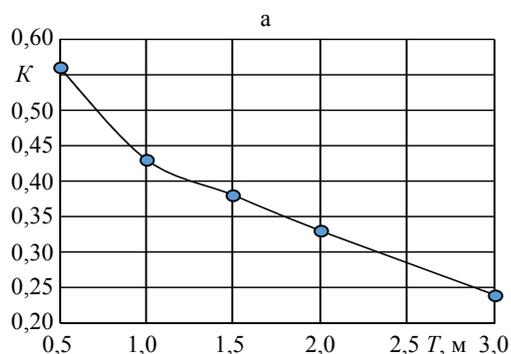


Рис. 4. Зависимости коэффициента передачи колебаний K от толщины инерционных бетонных плит длиной $L = 3$ м (рис. 4а) и соответствующего статического давления по его подошве p , т/м^2 (рис. 4б)

Fig. 4. Dependences of the vibration transmission coefficient K on the thickness of inertial concrete slabs with a length $L = 3$ m (Fig. 4a) and the corresponding static pressure along its sole p , t/m^2 (Fig. 4b).

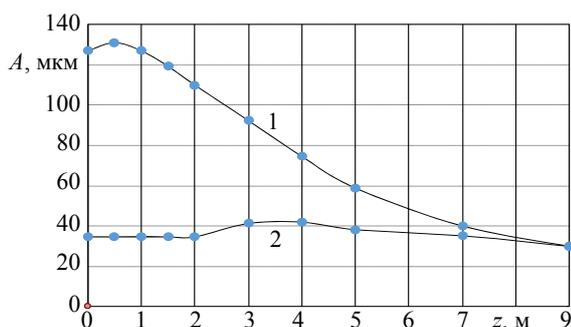


Рис. 5. Распределение вертикальных амплитуд перемещений A по глубине z от поверхности полупространства на расстоянии 22 м от источника воздействий без фундамента (1) и под ленточным фундаментом (2) шириной 3 м и глубиной заложения 2 м
Fig. 5. Distribution of vertical amplitudes of displacements A along the depth z from the surface of the half-space at a distance of 22 m from the source of impacts without foundation (1) and under a strip foundation (2) 3 m wide and 2 m deep

Игнорировать данный факт при оценке несущей способности конструкций зданий и сооружений нельзя. Для оценки относительного снижения колебаний грунта при наличии барьера по сравнению со свободным распространением колебаний в рассматриваемой точке (в нашем случае 22 м от источника колебаний) воспользуемся безразмерной величиной относительного снижения колебаний a , определяемой по формуле

$$a = \frac{A_{rs}}{A_r},$$

где A_{rs} – максимальная амплитуда колебаний грунта за горизонтальным инерционным барьером на расстоянии 22 м от источника колебаний; A_r – то же при отсутствии инерционного барьера на расстоянии 22 м от источника колебаний.

Величина относительного расстояния l определяется по формуле

$$l = \frac{L}{L_R},$$

где L – ширина инерционного барьера; L_R – длина поверхностной волны.

Были рассмотрены два типа динамических нагрузок – импульсное воздействие и установившиеся гармонические колебания. Длина поверхностной волны L_R составила 3,43 м при импульсном воздействии и 1,87, 3,64, 7,28 м

соответственно при частотах 50, 25 и 12,5 Гц. При определении длины волны период колебаний определялся по частоте собственных колебаний фундамента – источника ВДВ, для гармонических – по частоте вынужденных колебаний.

Зависимость $a = f(l)$ представлены на рис. 6а для импульсных и на рис. 6б для гармонических синусоидальных нагрузок.

Из представленных на рис. 6а данных следует, что с увеличением частоты вынужденных колебаний происходит снижение эффекта демпфирования. Например, если при длине плиты $L = 3$ м и частоте 25 Гц снижение составляет 82,3 %, то при частоте 50 Гц уже 68 %. В целом при увеличении длины барьера эффект демпфирования повышается. Наибольший эффект демпфирования колебания 86,7 % отмечается у барьера с $L = 15$ м, $T = 2$ м при частоте вынужденных колебаний 12,5 Гц.

Из представленных на рис. 6б данных следует, что с увеличением длительности импульса силы происходит значительное снижение эффекта демпфирования. Например, если при длине плиты $L = 3$ м и $t = 0,01$ с снижение составляет 67,5 %, то при $t = 0,08$ с уже 30 %. В целом при увеличении длины барьера эффект демпфирования повышается. При уменьшении длительности импульса ниже 0,02 с эффект демпфирования практически не изменяется.

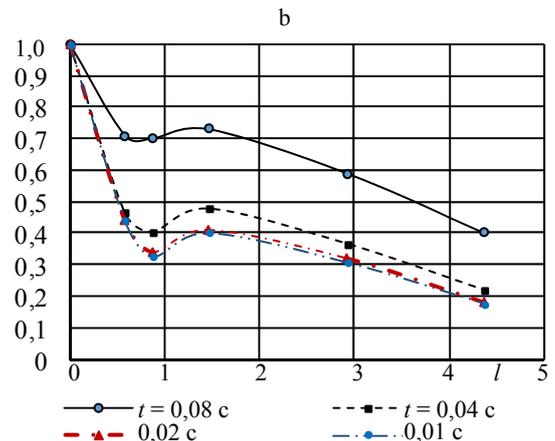
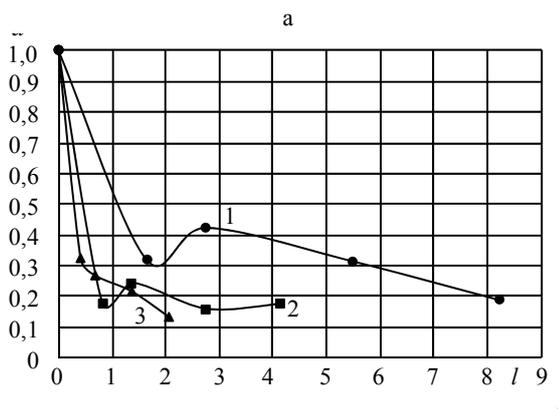


Рис. 6. Зависимость относительной амплитуды вертикальных колебаний a от относительного расстояния l :
а – 1 – при частоте $n = 50$ Гц; 2 – 25; 3 – 12,5 Гц;

б – при импульсном воздействии с различной величиной длительности t импульса

Fig. 6. Dependence of the relative amplitude of the vertical a on the relative distance l :

а – 1 – at a frequency of $n = 50$ Hz; 2 – 25; 3 – 12.5 Hz;

б – under pulse action with different values of pulse duration t

При изменении жесткости плиты (за счет ступенчатого уменьшения ее толщины T с 3 м в начале до 0,5 м в конце, считая от поверхности грунта, в направлении распространения колебаний) длиной $L = 10$ м при частоте вынужденных колебаний $n = 12,5$ Гц амплитуда вертикальных колебаний поверхности на расстоянии 22 м от источника ВДВ снизилась на 18,5 %. Объем бетона в плите уменьшился на 55 %. Таким образом, данный метод обладает большим потенциалом для дальнейшего совершенствования.

Для оценки применимости полученных данных к другим грунтовым условиям проведена серия аналогичных расчетов для грунтов с динамическими модулями упругости E , равными 100, 150, 200 и 250 МПа. Рассматривались вертикальные колебания поверхности грунта на 5 м за отсечной конструкцией шириной 3 м. Данные представлены на рис. 7.

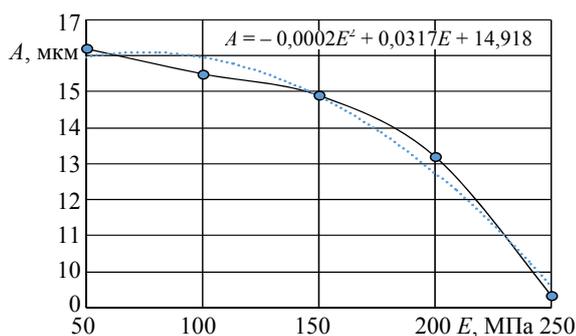


Рис. 7. Зависимость амплитуды вертикальных колебаний грунта A , мкм, от динамического модуля упругости E , МПа, на расстоянии 5 м от барьера шириной 3 м при вынужденной частоте колебаний $n = 25$ Гц

Fig. 7. Dependence of the amplitude of vertical oscillations of the soil A , μm , on the dynamic modulus of elasticity E , MPa, at a distance of 5 m from a barrier 3 m wide at a forced oscillation frequency $n = 25$ Hz

Из представленных данных следует, что с увеличением динамического модуля упругости среды E амплитуда вертикальных колебаний поверхности грунта значительно уменьшается. При увеличении модуля E в пять раз амплитуда A уменьшилась в 1,74 раза. Это связано с повышением сейсмической жесткости среды. Закономерности в демпфировании колебаний инерционной плитой не изменяются.

ВЫВОДЫ

1. Выявлены основные параметры горизонтального инерционного барьера, определяющие

эффект демпфирования колебаний, распространяющихся в грунтовой среде от внешних источников вибродинамических воздействий.

2. Использование горизонтального инерционного барьера в виде бетонной плиты, как способа виброизоляции зданий и сооружений от распространяющихся в грунте поверхностных волн, является эффективным техническим решением. Снижение вертикальных амплитуд колебаний поверхности грунта за барьером может достигать 87 % при гармонических колебаниях и 82 % при импульсных воздействиях. При этом барьер прост в изготовлении и не требует значительных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев, И. А. Влияние вибрации на основания и сооружения / И. А. Кудрявцев. Гомель: БелГУТ, 1999. 247 с.
2. Разработка способов повышения эксплуатационной надежности и долговечности конструкций зданий и сооружений при реконструкции и модернизации производства, сопровождающегося интенсивными вибродинамическими воздействиями: отчет о НИР (заключ.) / Белорусский национальный технический университет; рук. темы К. Э. Повколос. Минск, 2018. 82 с. № ГР 20160898.
3. Здания и сооружения. Оценка степени физического износа: ТКП 45-1.04-119-2008. Введ. 29.10.08. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2009. 136 с.
4. Мангушев, Р. А. Оценка динамического воздействия от вибропогружения шпунтовых свай на здания окружающей застройки в условиях слабых водонасыщенных грунтов / Р. А. Мангушев, А. В. Гурский, В. М. Полунин // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11, № 3. С. 102–116. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.3.09>.
5. Калюжнюк, М. М. Сваебойные работы при реконструкции (Влияние колебаний на здания и сооружения) / М. М. Калюжнюк, В. К. Рудь. Л.: Стройиздат, 1989. 160 с.
6. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Фундаменты при вибродинамических воздействиях. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-264-2012. Введ. 28.05.12. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012. 43 с.
7. Кузнецов, С. В. Горизонтальные сейсмические барьеры для защиты от сейсмических волн / С. В. Кузнецов, А. Э. Нафасов // Вестник МГСУ. 2010. Вып. 4. С. 131–134.
8. Chadwick, P. Foundations of the Theory of Surface Waves in Anisotropic Elastic Materials / P. Chadwick, G. D. Smith // Adv. Appl. Mech. 1977. Vol. 17. P. 303–376. [https://doi.org/10.1016/s0065-2156\(08\)70223-0](https://doi.org/10.1016/s0065-2156(08)70223-0).
9. Нафасов, А. Э. Сейсмические барьеры, для защиты уникальных и исторических зданий и сооружений: автореф. дис. ... к-та. техн. наук: 05.23.17 / А. Э. Нафасов; МГСУ. М., 2012. 20 с.
10. Берлинов, М. В. Основы комплексной оценки динамической работы строительных конструкций при вибрационных воздействиях промышленного оборудования:

дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01 / М. В. Берлинов. М., 2005. 302 л.

11. Баркан, Д. Д. Динамика оснований и фундаментов / Д. Д. Баркан. Л.: Стройвоенмориздат, 1948. 459 с.
12. Сеймов, В. М. Колебания круглого штампа при сейсмических воздействиях / В. М. Сеймов, В. Д. Шевченко // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: Материалы 4-й Всесоюз. конф. по динамике грунтов. Ташкент: Фан, 1977. С. 38–42.
13. Свинкин, М. П. Прогнозирование колебаний грунта при вибрациях фундаментов машин / М. П. Свинкин // Динамика сооружений. Киев: Будівельник, 1973. С. 34–37.
14. Таранов, В. Г. Методики экспериментального определения динамических характеристик основания фундаментов приемников колебаний / В. Г. Таранов // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: Материалы 4-й Всесоюз. конф. по динамике грунтов. Ташкент: Фан, 1977. С. 125–128.
15. Томсон, О. И. Колебания каркасов промышленных зданий / О. И. Томсон // Колебания зданий и сооружений: сб. статей. М.: Госстройиздат, 1963. С. 56–71.
5. Kalyuzhnyuk M. M., Rud V. K. (1989) *Piling Works During Reconstruction (Effect of Vibrations on Buildings and Structures)*. Leningrad, Stroyizdat Publ. 160 (in Russian).
6. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-5.01-264–2012. *Bases and Foundations of Buildings and Structures. Foundations under Vibrodynamic Effects. Design Rules*. Minsk, Stroytekhnorm Publ., 2012. 43 (in Russian).
7. Kuznetsov S. V., Nafasov A. E. (2010) Horizontal Seismic Barriers for Protection Against Seismic Waves. *Vestnik MGSU*, (4), 131–134 (in Russian).
8. Chadwick P., Smith G. D. (1977) Foundations of the Theory of Surface Waves in Anisotropic Elastic Materials. *Advances in Applied Mechanics*, 17, 303–376. [https://doi.org/10.1016/s0065-2156\(08\)70223-0](https://doi.org/10.1016/s0065-2156(08)70223-0).
9. Nafasov A. E. (2012) *Seismic Barriers to Protect Unique and Historic Buildings and Structures*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering. 20 (in Russian).
10. Berlinov M. V. (2005) *Fundamentals of a Comprehensive Assessment of the Dynamic Operation of Building Structures under Vibration Effects of Industrial Equipment*. Moscow. 302 (in Russian).
11. Barkan D. D. (1948) *Dynamics of bases and Foundations*. Leningrad, Stroyvoenmorizdat Publ. 459 (in Russian).
12. Seymov V. M., Shevchenko V. D. (1977) Oscillations of a Round Stamp under Seismic Effects. *Dinamika Osnovanii, Fundamentov i Podzemnykh So-Oruzhenii. Materialy 4 Vsesoyuznoi Konferentsii po Dinamike Gruntov* [Dynamics of Bases, Foundations and Underground Structures. Proceedings of the 4th All-Union Conference on Soil Dynamics]. Tashkent: Fan Publ., 38–42 (in Russian).
13. Svinkin M. P. (1973) Prediction of Ground Vibrations During Vibrations of Machine Foundations. *Building Dynamics*. Kyiv, Budivelnik Publ., 34–37 (in Russian).
14. Taranov V. G. (1977) Methods for Experimental Determination of the Dynamic Characteristics of the Base of the Foundations of Vibration Receivers. *Dinamika Osnovanii, Fundamentov i Podzemnykh So-Oruzhenii. Materialy 4 Vsesoyuznoi Konferentsii po Dinamike Gruntov* [Dynamics of Bases, Foundations and Underground Structures. Proceedings of the 4th All-Union Conference on Soil Dynamics]. Tashkent: Fan Publ., 125–128 (in Russian).
15. Tomson O. I. (1963) Vibrations of Frames of Industrial Buildings. *Kolebaniya Zdanii i Sooruzhenii: Sb. Statei* [Vibrations of Buildings and Structures. Collection of Articles]. Moscow: Gosstroizdat Publ., 56–71 (in Russian).

Поступила 10.02.2023

Подписана к печати 11.04.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Kudryavtsev I. A. (1999) *Effect of Vibration on Ground Beds and Structures*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 247 p. (in Russian).
2. Povkolas K. E. (2018) *Development of Ways to Improve Operational Reliability and Durability of Building Structures and Facilities During Reconstruction and Modernization of Production, Accompanied by Intense Vibrodynamic Effects*: Research Report (Conclusion) No GR 20160898. Minsk, Belarusian National Technical University. 82 (in Russian).
3. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-1.04-119–2008. *Buildings and Construction. Assessment of the Degree of Physical Wear*. Minsk, Stroyizdat Publ., 2009. 136 (in Russian).
4. Mangushev R. A., Gursky A. V., Polunin V. M. (2020) Evaluation of the Dynamic Impact From Vibration Driving of Sheet piles on the Buildings of Context Area in Conditions of Weak Water-Saturated Soils. *Construction and Geotechnics*, 11 (3), 102–116. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.3.09> (in Russian).

Received: 10.02.2023

Accepted: 11.04.2023

Published online: 31.07.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-294-300>

УДК 625.7/8: 691.175.5/8

Исследование влияния состава гидрофобного профилактического «Протект-01» на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий

Магистр В. В. Петрусевич¹⁾

¹⁾УО «Белорусский государственный университет транспорта» (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023

Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Асфальтобетонное покрытие в процессе эксплуатации подвергается различным деструктивным воздействиям, связанным с внешними природно-климатическими и эксплуатационными факторами, которые могут вызывать его преждевременный выход из строя. На протяжении последних 10 лет отмечается значительное увеличение парка автотранспортных средств в Республике Беларусь, а следовательно, и интенсивности движения на дорогах с пропорциональным ростом изнашивания и разрушения их покрытий. Данная ситуация усугубляется удлиненными межремонтными сроками ряда транспортных объектов. Необходимость в защите асфальтобетонных покрытий от воздействия внешних агрессивных сред определяет поиски новых технологических решений в создании нужных материалов, диапазон использования которых довольно широк. Существующие защитные композиции различаются как по назначению, так и по содержанию компонентов. Современные защитные обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, а также применяемые в дорожных организациях технологические процессы позволяют эффективно продлевать их срок службы. Вместе с тем выполненные в настоящее время научно-исследовательские работы, апробированные технологические процессы, а также известные труды ученых в данной области предлагают недостаточное количество обоснованных технических и конструктивных решений, позволяющих осуществлять непосредственно профилактическую защиту дорожных одежд и использовать для этой цели доступные, в том числе вторичные, материалы. Для эффективной защиты покрытий от комплексного воздействия воды и транспортных нагрузок в осенне-зимний и весенне-зимний периоды необходимы разработка и внедрение альтернативных технологий, одним из вариантов которых является обработка покрытий автомобильных дорог составом гидрофобным профилактическим «Протект-01». В статье представлены результаты исследований влияния обработки составом гидрофобным профилактическим «Протект-01» на водонасыщение (снижение на 30–40 %), морозостойкость (повышение на 10–12 %) и остаточную пористость (снижение на 12–25 %) кернов из асфальтобетонной смеси, а также установленные его оптимальные рецептуры.

Ключевые слова: состав гидрофобный профилактический, керны из асфальтобетонной смеси, водонасыщение, коэффициент морозостойкости, остаточная пористость асфальтобетона, оптимальная рецептура

Для цитирования: Петрусевич, В. В. Исследование влияния состава гидрофобного профилактического «Протект-01» на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В. В. Петрусевич // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 294–300. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-294-300>

Study of the Influence of the Composition of Hydrophobic Preventive “Protect-01” on the Physical and Mechanical Properties of Asphalt Concrete Pavement Materials

V. V. Petrusевич

¹⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. During operation, the asphalt concrete pavement is subjected to various destructive influences associated with external natural, climatic and operational factors, which can cause its premature failure. Over the past 10 years, there has been

Адрес для переписки

Петрусевич Вадим Владимирович
УО «Белорусский государственный университет транспорта»
ул. Кирова, 34,
246653, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 750-37-67
petrusевичv@gmail.com

Address for correspondence

Petrusevich Vadim V.
Belarusian State University of Transport
34, Kirova str.,
246653, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 750-37-67
petrusевичv@gmail.com

a significant increase in the fleet of vehicles in the Republic of Belarus, and, consequently, the intensity of traffic on the roads with a proportional increase in wear and destruction of their coatings. This situation is exacerbated by extended turnaround times for a number of transport facilities. The need to protect asphalt concrete pavements from the effects of external aggressive environments determines the search for new technological solutions in the creation of necessary materials, the range of which is quite wide. Existing protective compositions differ both in purpose and in the content of components. Modern research in the field of protective treatments for asphalt concrete pavements of highways, as well as technological processes used in road organizations, can effectively extend their service life. At the same time, the current research work, proven technological processes, as well as the well-known works of scientists in this field offer an insufficient number of sound technical and design solutions that allow for direct preventive protection of pavements and use for this purpose available, including secondary, materials. For more effective protection of pavements from the complex effects of water and traffic loads in the autumn-winter and spring-winter period, it is necessary to develop and implement alternative technologies, one of which is the treatment of road surfaces with the Protect-01 hydrophobic prophylactic composition. The paper presents the results of studies of the effect of treatment with the Protect-01 hydrophobic preventive composition on water saturation (decrease by 30–40 %,) frost resistance (increase by 10–12 %) and residual porosity (decrease by 12–25 %) of cores from asphalt concrete mixtures, as well as its optimal formulations.

Key words: hydrophobic preventive composition, bituminous concrete cores, water saturation, frost resistance coefficient, residual porosity of asphalt concrete, optimal formulation

For citation: Petrushevich V. V. (2023) Study of the Influence of the Composition of Hydrophobic Preventive “Protect-01” on the Physical and Mechanical Properties of Asphalt Concrete Pavement Materials. *Science and Technique*. 22 (4), 294–300. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-294-300> (in Russian)

Введение

На состояние автомобильных дорог оказывают влияние транспортные нагрузки и погодноклиматические факторы. Наиболее неблагоприятное воздействие производит умеренно континентальный климат с атлантическими циклонами. При этом повышение влагосодержания асфальтобетона и значительное количество переходов температуры через 0 °C приводят к увеличению разрушающего воздействия на покрытие [1–3].

Современные защитные обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, а также применяемые в дорожных организациях технологические процессы позволяют эффективно продлевать их срок службы.

Вместе с тем выполненные в настоящее время научно-исследовательские работы, апробированные технологические процессы, а также известные труды ученых в данной области предлагают недостаточное количество обоснованных технических и конструктивных решений, позволяющих осуществлять непосредственно профилактическую защиту дорожных одежд и использовать для этой цели доступные, в том числе вторичные, материалы.

Разрушения слоев дорожного покрытия от комплексного воздействия воды и транспортных нагрузок в осенне-зимний и весенне-зимний периоды эксплуатации подталкивает на поиски новых технологических решений в создании

защитных материалов. Существующие защитные композиции различаются как по назначению, так и по содержанию компонентов. Прогнозируется, что применение данных материалов увеличит долговечность покрытий с одновременным улучшением транспортно-эксплуатационных характеристик. При распределении на покрытия данные составы проникают в объем материала, заполняя микротрещины и дефекты, что может приводить к снижению водонасыщения, увеличению коэффициента морозостойкости, а также повышению коэффициента сцепления с колесами транспортных средств [4–7].

Решение данной задачи, направленной на повышение эксплуатационных характеристик и долговечности дорожных покрытий, может быть достигнуто при распределении состава гидрофобного профилактического «Протект-01» [8, 9] (далее – СГП) автомобильных дорог, позволяющего прогнозировать:

- 1) создание на поверхности, а также в трещинах и порах асфальтобетонных покрытий защитного водоотталкивающего слоя;
- 2) снижение водонасыщения покрытия;
- 3) снижение остаточной пористости покрытия;
- 4) повышение морозостойкости материала покрытия;
- 5) повышение коэффициента сцепления с колесами транспортных средств;
- 6) расширение области применения отходов нефтяной промышленности, а также образующихся в сфере производства и потребления.

Для достижения поставленных целей СГП включает в себя [9]:

- нефтешлам (отходы переработки нефти), содержащий каучук;
- органический растворитель;
- минеральный наполнитель;
- гидрофобизатор.

Распределение состава по покрытию автомобильной дороги производится автогудронатором с модернизированным рабочим органом (форсунками системы распределения), что позволяет максимально использовать существующую и эксплуатируемую в дорожных организациях технику. В данной работе проведен анализ водонасыщения, коэффициента морозостойкости и остаточной пористости чистых и обработанных СГП кернов из асфальтобетонной смеси (согласно СТБ 1115–2013 [10]).

Материалы и методы исследований

Для проведения испытаний выбраны керны из асфальтобетонной смеси типа А, Б, В, Г, Д [10]. Обработка исследуемых кернов и образцов производилась СГП, который состоит из связующего, представляющего собой отходы от переработки нефтепродуктов (шлам от очистки резервуаров ОАО «Мозырский НПЗ»), минерального наполнителя (при этом растворителем является керосин, ГОСТ 18499–73), и одновременно с этим состав дополнительно содержит гидрофобизатор.

В качестве минерального наполнителя использовали дефекат – отход сахарного производства ОАО «Слуцкий сахарорафинадный завод», который образуется в процессе очистки сока сахарной свеклы известью и имеющий состав, мас. %: CaCO_3 – 65,5–77,8; MgCO_3 – 3,4–8,6; Al_2O_3 – 0,2–3,8; P_2O_5 – 0,9–1,3; Fe_2O_3 – 0,2–1,0; органические вещества 12,0–15,0. Используемый дефекат представлял собой мелкодисперсный порошок светло-коричневого цвета. В качестве гидрофобизатора состав содержит метилсиликонат натрия в виде кремнийорганической гидрофобизирующей жидкости ТУ 2229-008-42942526-00.

СГП готовили путем совмещения навесок исходных компонентов в лабораторном лопастном смесителе в течение 30 мин при температуре 25 °С. Для проведения испытаний подготовили следующие рецептуры СГП (табл. 1).

Исследование влияния профилактической обработки на водонасыщение асфальтобетонной смеси. Определение количества воды, поглощенной образцом при заданном режиме насыщения, определяли согласно СТБ 1115–2013 [10]. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Полученные результаты позволяют установить закономерности влияния содержания компонентов СГП на водонасыщение обрабатываемого покрытия (рис. 1).

Таблица 1

Рецептуры состава гидрофобного профилактического
Recipes of the hydrophobic preventive composition

Компонент	Рецептура				
	1	2	3	4	5
Связующее (шлам от очистки резервуаров), мас. %	55	60	65	70	75
Минеральный наполнитель, мас. %	16	14	12	10	8
Растворитель, мас. %	19	16	13	10	7
Гидрофобизатор, мас. %	10	10	10	10	10

Таблица 2

Результаты испытания образцов на водонасыщение
Water saturation test results

Показатель	Тип асфальтобетона, из которого изготовлены керны	Способ обработки					
		Чистый образец (средний по результатам трех испытаний)	Рецептура состава (средняя по результатам трех испытаний)				
			1	2	3	4	5
Водонасыщение, %	Тип А	2,5	1,9	1,5	1,4	1,5	1,8
	Тип Б	2,00	1,6	1,2	1,1	1,3	1,7
	Тип В	1,75	1,5	1,25	1,2	1,4	1,6
	Тип Г	2,8	2,4	2,25	2,2	2,2	2,5
	Тип Д	2,9	2,5	2,4	2,4	2,45	2,8

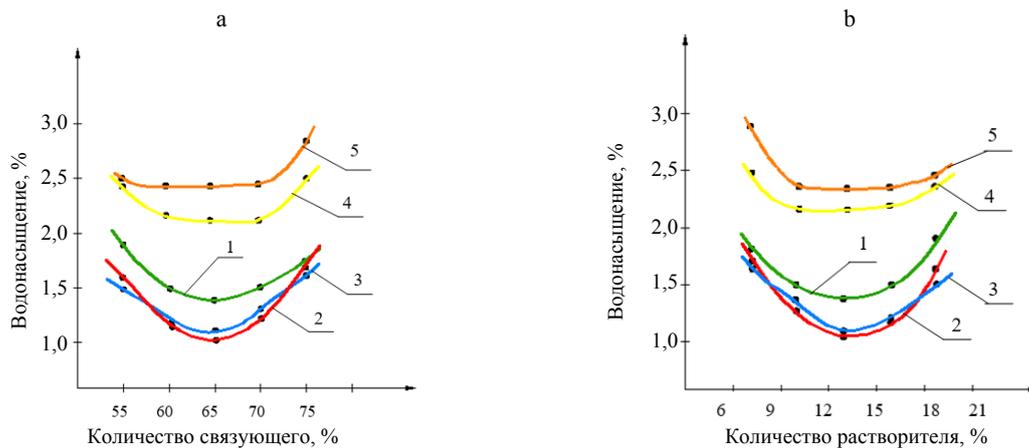


Рис. 1. Влияние содержания компонентов состава гидрофобного профилактического на водонасыщение асфальтобетонных образцов: а – связующего; б – растворителя; 1 – тип А; 2 – тип Б; 3 – тип В; 4 – тип Г; 5 – тип Д
 Fig. 1. Influence of the content of the components of the hydrophobic preventive composition on water saturation of asphalt concrete samples: а – binder; б – solvent; 1 – type А; 2 – type Б (B); 3 – type В (V); 4 – type Г (G); 5 – type Д (D)

Анализируя полученные результаты, необходимо отметить снижение водонасыщения обработанных образцов на 30–40 %, при этом следует признать, что наиболее высокие гидрофобные свойства выявлены у СГП, изготовленного по рецептуре 3, имеющего, мас. %: связующее (нефтешлам) – 70; минеральный наполнитель (дефекат) – 12; органический растворитель (керосин) – 13; гидрофобизатор – остальное. Худшие показатели гидрофобных свойств у СГП, изготовленного по рецептурам 1 и 5, ввиду слишком большого и недостаточного количества растворителя соответственно.

Возможными причинами различия в значениях водонасыщения для асфальтобетонов разных типов являются их разная плотность и гетерогенность, определяемые соотношением содержащихся в них материалов. Более низкие показатели водонасыщения наблюдаются у асфальтобетонных образцов из смесей типов Г, Д вследствие наличия в их составе значительного количества мелкофракционных минеральных материалов (песка природного дробленого или из отсева дробления) и недостаточного для них количества битума, а также из смеси типа А, у которой количество крупного заполнителя от 50 до 65 % от массы и недостаточное количество битума (4,5–5,5 % от массы) СТБ 1033–2016 [11, с. 3–14]. Это приводит к неравномерному проникновению в глубь материала при обработке составом. При этом соотношения материалов у асфальтобетонных смесей типов Б, В (СТБ 1033–2016 [11, с. 3–14]) более оптимальны с точки зрения гомогенно-

сти, что позволяет СГП равномерно проникать в глубь материала, обеспечивая более высокие показатели водонасыщения.

Полученные результаты позволяют установить закономерности влияния содержания компонентов СГП на водонасыщение обрабатываемого покрытия и его оптимальную рецептуру (рис. 2).

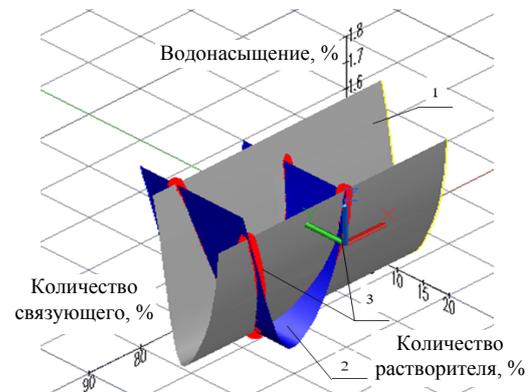


Рис. 2. Влияние содержания компонентов состава гидрофобного профилактического на водонасыщение асфальтобетонных образцов типа Б: 1 – растворителя; 2 – связующего; 3 – оптимальное соотношение

Fig. 2. Influence of the content of the hydrophobic preventive composition components for water saturation of asphalt concrete samples of type Б (B): 1 – solvent; 2 – binder; 3 – optimal ratio

Исследование влияния СГП на морозостойкость асфальтобетонной смеси. Оценка влияния профилактической обработки на морозостойкость асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги может быть получена посредством

анализа коэффициента морозостойкости. Сущность метода заключается в оценке потери прочности при сжатии предварительно водонасыщенных образцов, приготовленных в лаборатории согласно СТБ 1115–2013 [10], после воздействия на них 50 циклов замораживания-оттаивания.

Проведение испытаний и обработку результатов произвели согласно СТБ 1115–2013 [10]. Полученные результаты коэффициента морозостойкости приведены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, увеличение коэффициента морозостойкости на 10–12 % свидетельствуют об эффективности профилактической обработки. При этом анализ полученных результатов показывает, что наиболее высокий коэффициент морозостойкости для всех типов асфальтобетонной смеси обеспечивает рецептура 3 СГП, содержащая, мас. %: связующее (нефтешлам) – 65; минеральный наполнитель (дефекат) – 12; растворитель (керосин) – 13; гидрофобизатор – остальное. Наиболее низкие значения коэффициента морозостойкости наблюдаются у рецептуры 5 СГП ввиду недостаточного количества растворителя.

Полученные результаты позволяют установить закономерности влияния содержания компонентов СГП на коэффициент морозостойкости обрабатываемого покрытия (рис. 3).

Анализ рис. 3 показывает, что у образцов из асфальтобетонной смеси типа Б наблюдается наиболее высокий коэффициент морозостойкости, что может быть обусловлено однородностью материала и равномерным проникновением в его объем СГП. У образцов из асфальтобетонных смесей типов В, Г, Д (вследствие наличия в их составе значительного количества мелкофракционных минеральных компонентов) и типа А, у которого крупного заполнителя содержится от 50 до 65 % от массы и вяжущего 4,5–5,5 % от массы (СТБ 1033–2016 [11, с. 3–14]), не обеспечивается достаточная однородность и равномерное проникновение СГП в объем материала при обработке.

Полученные результаты позволяют установить закономерности влияния содержания компонентов СГП на коэффициент морозостойкости обрабатываемого покрытия и его оптимальную рецептуру (рис. 4).

Таблица 3

Результаты испытаний по определению коэффициента морозостойкости
Test results to determine the frost resistance coefficient

Показатель	Тип асфальтобетона, из которого изготовлены керны	Способ обработки					
		Чистый образец (средний по результатам трех испытаний)	Рецептура СГП (средняя по результатам трех испытаний)				
			1	2	3	4	5
Коэффициент морозостойкости	Тип А	0,81	0,86	0,87	0,89	0,87	0,84
	Тип Б	0,82	0,89	0,90	0,89	0,86	0,84
	Тип В	0,77	0,82	0,85	0,86	0,85	0,81
	Тип Г	0,72	0,75	0,79	0,80	0,77	0,74
	Тип Д	0,70	0,75	0,76	0,76	0,74	0,74

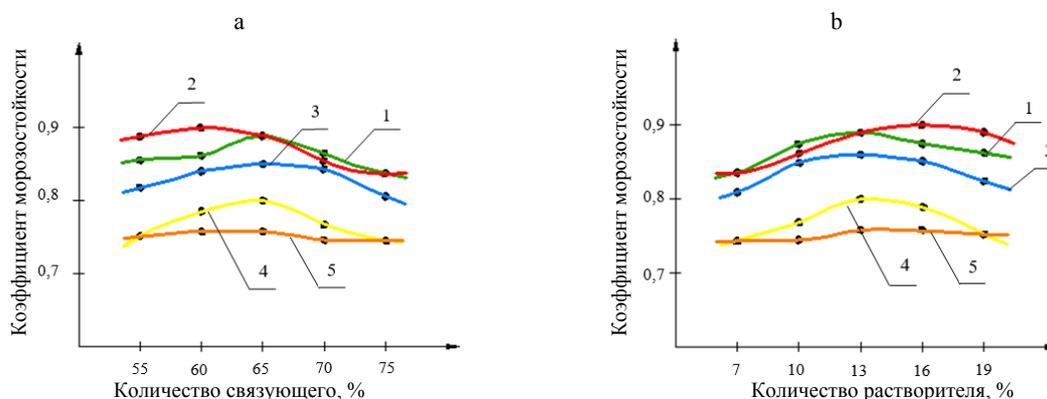


Рис. 3. Зависимость коэффициента морозостойкости асфальтобетонных образцов от содержания компонентов СГП: а – связующего; б – растворителя; 1 – тип А; 2 – тип Б; 3 – тип В; 4 – тип Г; 5 – тип Д

Fig. 3. Dependence of frost resistance coefficient of asphalt concrete samples on the content of the hydrophobic preventive composition components: a – binder; b – solvent 1 – type А; 2 – type Б (B); 3 – type В (V); 4 – type Г (G); 5 – type Д (D)

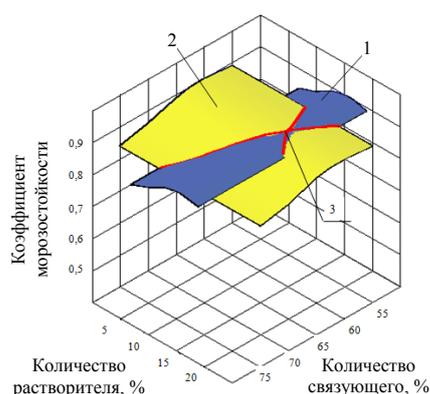


Рис. 4. Зависимость коэффициента морозостойкости асфальтобетонных образцов типа Б от содержания компонентов СГП: 1 – растворителя; 2 – связующего; 3 – оптимальное соотношение

Fig. 4. Dependence of frost resistance coefficient of asphalt concrete samples of type Б (B) from the content of SGP components: 1 – solvent; 2 – binder; 3 – optimal ratio

Исследование влияния СГП на остаточную пористость асфальтобетонной смеси. Оценка влияния СГП на остаточную пористость асфальтобетонной смеси выполнена на образцах согласно методике, изложенной в СТБ 1115–2013 [8]. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Полученные результаты позволяют установить закономерности влияния содержания компонентов СГП на остаточную пористость обрабатываемого покрытия (рис. 5).

Анализируя рис. 5, стоит отметить, что уменьшение остаточной пористости на 12–25 % свидетельствует об эффективности профилактической обработки. При этом анализ полученных результатов показывает, что наиболее низкие значения остаточной пористости обеспечивает рецептура 3 СГП.

Таблица 4

Результаты испытаний по определению остаточной пористости
Results of tests to determine the residual porosity

Показатель	Тип асфальтобетона, из которого изготовлены керны	Способ обработки			
		Чистый образец (средний по результатам трех испытаний)	Рецептура СГП (средняя по результатам трех испытаний)		
			2	3	4
Остаточная пористость, %	Тип А	1,6	1,3	1,2	1,35
	Тип Б	2,9	2,4	2,4	2,5

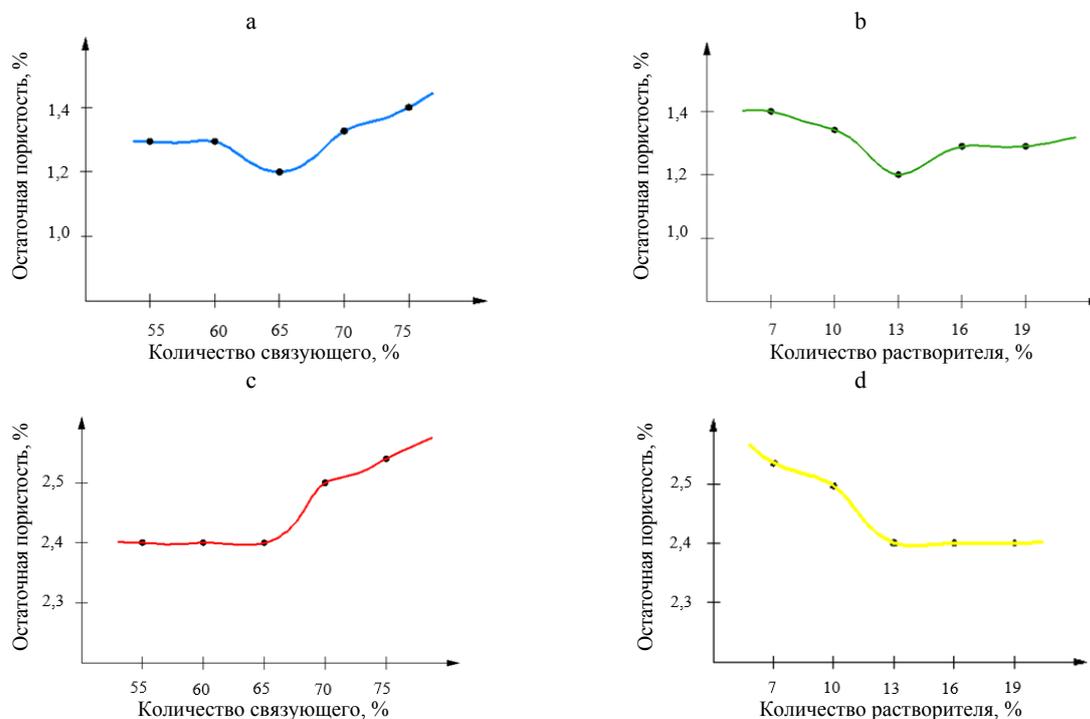


Рис. 5. Зависимость остаточной пористости асфальтобетонных образцов от содержания компонентов СГП: а, б – тип А; с, д – тип Б
Fig. 5. Dependence of residual porosity of asphalt concrete samples on the content of SGP components: а, б – type А; с, д – type Б (B)

ВЫВОДЫ

Исходя из представленных в работе результатов экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

– эффективность СПП подтверждается проведенными исследованиями;

– экспериментально установлены закономерности влияния рецептур СПП на водонасыщение (снижение на 30–40 %), коэффициент морозостойкости (повышение на 10–12 %), остаточную пористость (снижение на 12–25 %) обработанных асфальтобетонных смесей;

– наиболее оптимальные показатели обеспечивает СПП, изготовленный по рецептуре 3, имеющий мас. %: связующее (шлам от очистки резервуаров) – 65, минеральный наполнитель – 12, растворитель – 13 и гидрофобизатор – остальное.

ЛИТЕРАТУРА

- Ковалев, Я. Н. Дорожно-строительные материалы и изделия: учеб.-метод. пособие / Я. Н. Ковалев, С. Е. Кравченко, В. К. Шумчик. Минск: Новое знание: М.: Инфра-М, 2018. 628 с.
- Бочкарев, Д. И. Исследование влияния профилактической обработки на эксплуатационные и физико-механические свойства материалов автодорожных покрытий / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевиц // Горная механика и машиностроение. 2018. № 2. С. 82–88.
- Петрусевиц, В. В. Подбор оптимального состава профилактической обработки и анализ его влияния на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В. В. Петрусевиц // Горная механика и машиностроение. 2019. № 2. С. 73–77.
- Методология оценки воспроизводимости коэффициента сцепления асфальтобетонного покрытия при его профилактической обработке в лабораторных и реальных условиях дорожных испытаний / Д. И. Бочкарев [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. 2019. № 1. С. 25–30.
- Бочкарев, Д. И. Исследование влияния гидрофобной профилактической обработки на морозостойкость асфальтобетонной смеси / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевиц // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 25–26 ноября, 2021 г.: в 2 ч. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Гомель: БелГУТ, 2021. Ч. 1. С. 257–258.
- Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2013. <https://doi.org/10.17226/22766>.
- Lee, Ch. Alligator Cracking Performance and Life-Cycle Cost Analysis of Pavement Preservation Treatments / Ch. Lee, W. A. Nokes, J. T. Harvey [Electronic Resource] // University of California Pavement Research Center. 2008. Mode of access: <https://escholarship.org/uc/item/893562th>.
- Состав гидрофобный профилактический Протект-01: Технические условия ТУ ВУ 192670194.002–2019. Введ. 03.10.2019. Минск: Минстройархитектуры. 2019. 29 с.
- Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: заявка ВУ а 20180114 / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевиц. Опубл. 30.10.2019.
- СТБ 1115–2013. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний. Введ. 01.07.2014. Минск: Госстандарт, 2014. 50 с.
- СТБ 1033–2016. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. Введ. 01.07.2017. Минск: БелдорНИИ, 2017. 44 с.

Поступила 17.03.2023

Подписана к печати 23.05.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

- Kovalev Ya. N., Kravchenko S. E., Shumchik V. K. (2018) *Road-Building Materials and Products*. Minsk, Novoye Znanie Publ.; Moscow, Infra-M Publ. 628 (in Russian).
- Bochkarev D. I., Petrushevich V. V. (2018) Study of the Influence of Preventive Treatment on the Operational and Physical and Mechanical Properties of Road Pavement Materials. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroenie = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, (2), 82–88 (in Russian).
- Petrusevich V. V. (2019) Selection of the Optimal Composition of Preventive Treatment and Analysis of its Effect on the Physical and Mechanical Properties of Asphalt Concrete Pavement Materials. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroenie = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, (2), 73–77 (in Russian).
- Bochkarev D. I., Shapovalov V. M., Petrushevich V. V., Katsubo P. A. (2019) Methodology for Assessing the Reproducibility of Adhesion Coefficient of Asphalt Concrete Pavement During its Preventive Treatment in Laboratory and Real Road Test Conditions. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty [Highways and Bridges]*, (1), 25–30 (in Russian).
- Bochkarev D. I., Petrushevich V. V. (2021) Study of the effect of Hydrophobic Preventive Treatment on the Frost Resistance of an Asphalt Concrete Mixture. *Problemy Bezopasnosti na Transporte: Materialy XI Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Gomel', 25–26 Noyabrya, 2021 g. Ch. 1 [Transport Safety Issues: Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference, Gomel, 25–26 November 2021. Part 1]*. Gomel, Belarusian State University of Transport, 257–258 (in Russian).
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2013) *Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22766>.
- Lee Ch., Nokes W. A., Harvey J. T. (2008) Alligator Cracking Performance and Life-Cycle Cost Analysis of Pavement Preservation Treatments. *University of California Pavement Research Center*. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/893562th>.
- TU [Specifications] BY 192670194.002–2019. *Hydrophobic Preventive Composition PROTEKT-01*. Minsk, Publishing House of Minstroyarkhitektury, 2019. 29 (in Russian).
- Bochkarev D. I., Petrushevich V. V. (2019) Hydrophobic Composition for Preventive Treatment of Asphalt Concrete Pavements of Highways: Application BY No a 20180114 (in Russian).
- STB [Standards of the Republic of Belarus] 1115-2013. *Asphalt Concrete Mixes for Road, Airfield and Asphalt Concrete. Test Methods*. Minsk, Gosstandart Publ., 2014. 50 (in Russian).
- STB [Standards of the Republic of Belarus] 1033–2016. *Asphalt Concrete Mixes for Road, Airfield and Asphalt Concrete. Specifications*. Minsk, Belarus Road Research Institute, 2017. 44 (in Russian).

Received: 17.03.2023

Accepted: 23.05.2023

Published online: 31.07.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-301-307>

УДК 625.033.34

Метод определения достаточности сети автомобильных дорог региона

Доктора техн. наук П. А. Пегин¹⁾, Д. В. Капский²⁾,
А. А. Ильин¹⁾, Е. В. Рунев¹⁾

¹⁾Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Российская Федерация),

²⁾Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Оценка состояния опорной сети автомобильных дорог региона необходима для определения уровня транспортной доступности и мобильности населения в конкретном районе. Опорная сеть автомобильных дорог – это дороги, по которым осуществляются перевозки грузов и пассажиров на личном, общественном и коммерческом транспорте. В настоящее время оценку сети автомобильных дорог производят с помощью географических, экономических, математических и общетехнических параметров. Недостатком этих способов оценки является отсутствие комплексного анализа как уровня развития опорной сети автомобильных дорог, так и транспортной доступности региона. Авторы предлагают метод аддитивного многокритериального моделирования с использованием весовых коэффициентов. Рассмотрены параметры и выбраны весовые коэффициенты, существенно влияющие на достоверность определения достаточности сети автомобильных дорог. Выполнен анализ отдельных критериев качества транспортной сети. На основании использования статистических параметров определены значения весовых коэффициентов аддитивной модели. Предложенный метод с применением аддитивной многокритериальной модели является достоверным и универсальным, что позволяет комплексно оценивать опорную сеть автомобильных дорог в совокупности с другими путями сообщения (железнодорожным, авиационным и водным транспортом). Кроме того, метод может стать частью методологии обоснования включения проектируемых автомобильных дорог в опорную сеть региона.

Ключевые слова: дорога, автомобиль, регион, транспортная сеть, плотность дорожной сети, коэффициент качества достаточности сети, экспертная оценка, коэффициент аддитивности, матрица ковариаций, множественная регрессионная модель

Для цитирования: Метод определения достаточности сети автомобильных дорог региона / П. А. Пегин [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 301–307. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-22-4-301-307>

Method to Define Whether the Road Network is Sufficient for the Region

P. A. Pegin¹⁾, D. V. Kapski²⁾, A. A. Ilyin¹⁾, E. V. Runev¹⁾

¹⁾Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Saint Petersburg, Russian Federation),

²⁾Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An assessment of the state of the region's core road network is necessary to determine the level of transport accessibility and mobility of the population in a particular area. The core road network is the roads along which goods and passengers are transported by personal, public and commercial vehicles. Currently, the assessment of the road network is carried out using geographical, economic, mathematical and general technical parameters. The disadvantage of these assessment methods is the lack of a comprehensive analysis of both the level of development of the core road network and the transport accessibility of the region. The authors propose a method of additive multicriteria modeling using weight coefficients. The parameters

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь
просп. Независимости, 66,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-11-57
d.kapsky@gmail.com

Address for correspondence

Kapski Denis V.
Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus
66, Nezavisimosty Ave.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-11-57
d.kapsky@gmail.com

have been considered and weight coefficients have been selected, which significantly affect the reliability of determining the sufficiency of the road network. The analysis of individual criteria for the quality of the transport network has been carried out. Based on the use of statistical parameters, the values of the weight coefficients of the additive model have been determined. The proposed method using an additive multi-criteria model is reliable and universal, which makes it possible to comprehensively evaluate the core network of roads in conjunction with other means of communication (railway, air and water transport). In addition, the method can become part of the methodology for substantiating the inclusion of the designed roads in core network of the region.

Keywords: road, car, region, transport network, traffic network density, ranking method, scoring method, expert estimation, additivity factor, covariance matrix

For citation: Pegin P. A., Kapski D. V., Ilyin A. A., Runev E. V. (2023) Method to Define Whether the Road Network is Sufficient for the Region. *Science and Technique*. 22 (4), 301–307. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-22-4-301-307> (in Russian)

Введение

Перед проектировщиками, занимающимися вопросами, связанными с проектированием новой опорной сети и модернизацией, неизбежно встает вопрос: будет ли она эффективной? Методы решения данной задачи изложены в [1–6]. В большинстве опубликованных работ в качестве основных критериев оценки используются относительные коэффициенты, которые в зависимости от исходных параметров можно разделить на показатели:

- географические;
- экономические;
- математические;
- общетехнические.

Для оценки эффективности работы опорной сети автомобильных дорог региона и внесения корректировок в существующую сеть предлагается использовать параметры, приведенные на рис. 1 [7–9].

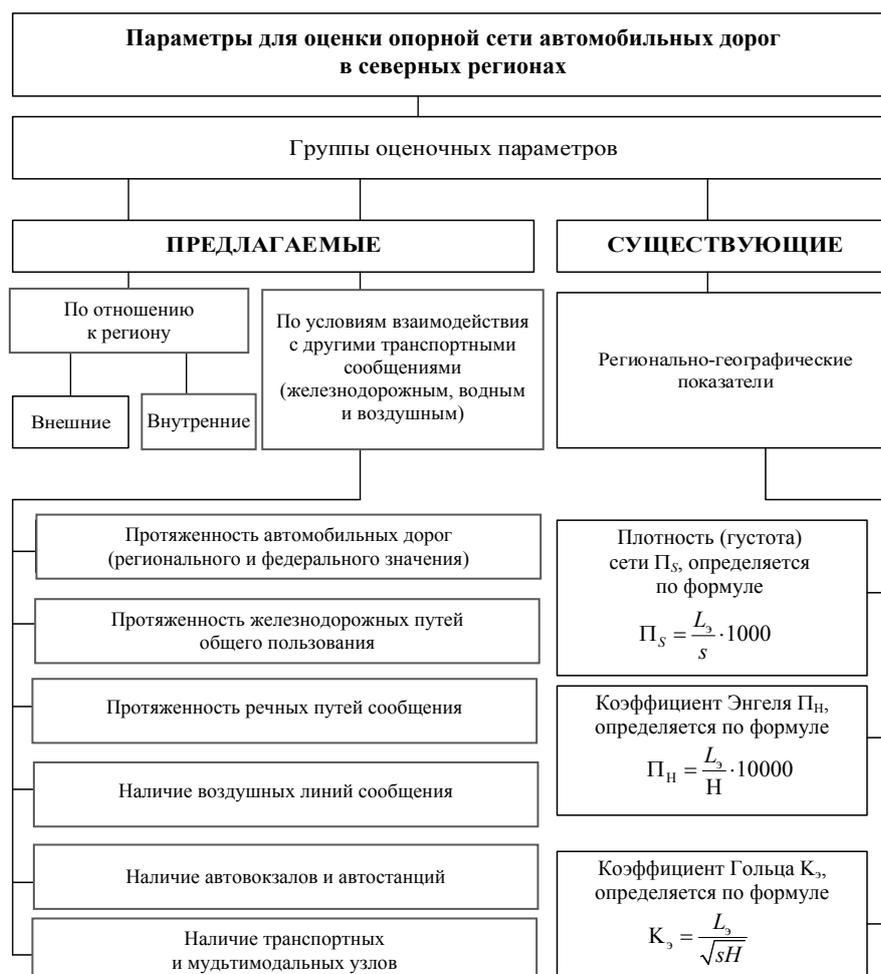


Рис. 1. Параметры для оценки опорной сети автомобильных дорог региона

Fig. 1. Parameters for assessing the core road network of the region

Аддитивная многокритериальная модель

При рассмотрении аддитивной многокритериальной модели достаточности сети муниципальных автомобильных дорог введем следующие обозначения:

Y – коэффициент достаточности сети автомобильных дорог, определяемый по совокупным признакам (факторам);

X_i – факторы, влияющие на качество сети автомобильных дорог (случайные величины), $i = 1, \dots, n$;

$x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m}$ – выборочное значение i -го фактора в m муниципальных образованиях;

$y_{i_1}, y_{i_2}, \dots, y_{i_m}$ – то же коэффициента качества сети в m муниципальных образованиях.

Зависимость коэффициента транспортной сети (аддитивная модель) представляет уравнение следующего вида:

$$\hat{Y} = \alpha_1 \hat{X}_1 + \dots + \alpha_n \hat{X}_n, \quad (1)$$

где $\hat{Y} = y_1, \dots, y_m$ – значение коэффициента качества достаточности сети, определяемого совокупностью признаков X_i , α_i ; весовые коэффициенты (параметры модели), определяемые методами экспертных оценок, удовлетворяющие условию нормировки $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$; $\hat{X}_i = x_{i_1}, \dots, x_{i_m}$ – значение i -го признака по m муниципальным образованиям.

В указанной модели \hat{Y} – значение линейного функционала $\hat{Y} = F(\hat{X}_1, \dots, \hat{X}_n)$ относительно переменных $\{\hat{X}_i\}$. Указанный функционал удовлетворяет условию невырожденности: если признаки принимают нулевые значения: $\hat{X}_i = 0, \dots, 0$, то

$$\hat{Y} = F((0, \dots, 0)_1, \dots, (0, \dots, 0)_n) = 0.$$

Для объективного оценивания транспортной сети рассмотрим два метода определения весовых коэффициентов аддитивной модели: метод ранжирования и метод приписывания баллов.

Метод ранжирования

$$\alpha_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (2)$$

где r_i – суммарная оценка всех l экспертов для данного i -го признака,

$$r_i = \sum_{j=1}^l r_{ji};$$

r_{ij} – оценка, присвоенная j -м экспертом i -му признаку (критерию); $i = 1, \dots, n$.

Метод приписывания баллов

$$r_{ji} = \frac{h_{ji}}{\sum_{i=1}^n h_{ji}}, \quad (3)$$

где h_{ij} – балл j -го эксперта для i -го критерия;

$\sum_{i=1}^n h_{ij}$ – сумма j -й строки.

Тогда, учитывая, что

$$r_i = \sum_{j=1}^l r_{ji},$$

получим

$$\alpha_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}.$$

В процессе выполнения работ оценки эффективности опорной сети автомобильных дорог экспертов необходимо подбирать таким образом, чтобы они имели равную компетентность. Если это невозможно сделать, то в расчетах необходимо вводить поправочный коэффициент. Пусть компетентность j -го эксперта оценивается положительной величиной β_j (вес эксперта). Будем считать, что веса компетентности экспертов нормированы

$$\sum_{j=1}^l \beta_j = 1.$$

Тогда для метода ранжирования r_i рассчитаем по формуле

$$r_i = \sum_{j=1}^l r_{ji} \beta_j.$$

Аналогичную формулу получаем для метода приписывания баллов [4, 10].

Иногда значения β_j выбирают из интервала $0 \leq \beta_j \leq 1$.

При решении задачи по оценке состояния опорной сети в девяносто пяти случаях из 100 результаты оценки каждого эксперта заранее не известны. Эти результаты, согласно теории вероятностей, следует рассматривать как значения (реализации), принимаемые некоторой случайной величиной [11–13]. Тогда для оценки параметров сети будем использовать методы математической статистики.

Среднее значение оценки для i -го параметра сети определим по формуле

$$\bar{r}_i = \frac{\sum_{j=1}^l r_{ji}}{l} = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l r_{ji} = \frac{r_i}{l}. \quad (4)$$

Среднее значение выражает коллективное мнение группы экспертов о параметрах оценки сети. При применении данного метода необходимо стремиться к тому, чтобы расхождения в оценке экспертов были минимальными. В процессе подготовки заключения об оценке эффективности опорной сети рекомендуется учитывать степень согласованности мнений экспертов. В качестве критерия согласованности мнения экспертов в новой методике предлагается использовать выборочную дисперсию оценок

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l (r_{ji} - \bar{r}_i)^2. \quad (5)$$

О том, что оценки экспертов имеют большую сходимость, свидетельствует меньшее значение дисперсии. Данный параметр предпочтительно использовать при оценке состояния дорожно-транспортной сети. При этом для оценки надежности принятого экспертами решения используется коэффициент вариации

$$\beta = \frac{\sigma_i}{r_i}.$$

Для уравнения интегрального показателя оценки состояния сети необходимы весовые коэффициенты. В предлагаемой методике с использованием метода ранжирования целесообразно их определять на основании среднего значения оценки \bar{r}_i

$$\alpha_i^* = \frac{\bar{r}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{r}_i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Для того чтобы экспертиза была достоверной, необходимо в методике заранее установить следующие параметры:

- численный состав экспертной группы;
- уровень компетентности экспертов (наличие ученой степени, опыт работы в данной отрасли);
- перечень параметров оценки сети.

Применение формальных методов определения весовых коэффициентов

Рассматриваются методы, позволяющие на основании информации о качестве значений отдельных признаков (критериев) качества транспортной сети определять значения весовых коэффициентов аддитивной модели [13, 14].

Первый метод. Для каждого отдельного признака (критерия) качества транспортной X_i сети ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) на основании максимального и минимального значения вычисляется коэффициент относительного разброса по формуле

$$\Delta_i = \frac{\hat{X}_{i\max} - \hat{X}_{i\min}}{\hat{X}_{i\max}} = 1 - \frac{\hat{X}_{i\min}}{\hat{X}_{i\max}}, \quad (7)$$

где $\hat{X}_{i\min} = \min \hat{X}_i$; $\hat{X}_{i\max} = \max \hat{X}_i$, который определяет максимально возможное отклонение по i -му признаку. Весовые коэффициенты α_i принимают наибольшее значение для тех критериев, относительный разброс которых в области оценок наиболее значителен:

$$\alpha_i = \frac{\Delta_i}{\sum_{k=1}^n \Delta_k}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Второй метод. Пусть все $\hat{X}_{i\min} \neq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Тогда рассматриваются коэффициенты, которые характеризуют отклонение отдельного признака от его наименьшего значения:

$$\beta_i = \frac{\hat{X}_i - \hat{X}_{i\min}}{\hat{X}_{i\min}}, \quad (9)$$

Принимаем, что значимость показателя, характеризующего опорную сеть, зависит от выполнения неравенства (критерия)

$$\beta_i \leq \alpha_i. \quad (10)$$

Здесь константы α_i задаются исследователем из условия: чем важнее параметр, характеризующий опорную сеть, тем меньше выбирается значение α_i .

Пусть R_i^* – наибольший радиус шара, построенного около точки минимума ($\hat{X}_i^* - i$)-го признака, внутри которого точки $\hat{X}_i \in B_{R_i^*}(\hat{X}_i^*)$ (шар радиуса R_i^* с центром в \hat{X}_i^*) удовлетворяют условию. Тогда

$$R_i^* = \max_{\beta_i \leq \alpha_i} \left\{ \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{ik}^*)^2} \right\} = \max_{\beta_i \leq \alpha_i} \|\hat{X}_i - \hat{X}_i^*\|,$$

при условии

$$\beta_i = \frac{\hat{X}_i - \hat{X}_{i\min}}{\hat{X}_{i\min}} \leq \alpha_i. \quad (11)$$

Очевидно, что чем больше радиус шара R_i^* , в котором относительное отклонение i -го признака от его минимального значения не превосходит α_i , тем меньше надо выбирать значение весового коэффициента α_i

$$\alpha_i = \frac{1}{R_i^*}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (12)$$

Оценка коэффициентов аддитивной многокритериальной модели

Рассматривается задача оценивания коэффициентов аддитивной многокритериальной модели качества сети муниципальных автомобильных дорог. Зависимость коэффициента транспортной сети представлена в виде множественной регрессионной модели:

$$Y = \lambda_1 X_1 + \dots + \lambda_n X_n + \xi, \quad (13)$$

где ξ – случайная помеха (отклонение); λ_i – весовые коэффициенты (параметры модели).

Заметим, что Y, X_i – случайные величины, имеющие неизвестное нам распределение.

Для определения весовых коэффициентов модели исходной точкой является предположе-

ние, что совокупность случайных величин X_i – попарно некоррелированные факторы, т. е.

$$\text{cov}(X_i, X_j) = DX_i \delta_{ij},$$

или, что равносильно:

$$r(X_i, X_j) = \delta_{ij}.$$

В случае базиса из некоррелированных случайных факторов для весовых коэффициентов легко получить выражения

$$\lambda_i = \frac{\text{cov}(Y, X_i)}{DX_i}, \quad (14)$$

а уравнение множественной регрессии запишется в виде

$$\frac{y}{\sqrt{DY}} = \sum_{i=1}^n r(Y, X_i) \frac{x_i}{\sqrt{DX_i}}. \quad (15)$$

В случае, если распределения заданы выборками, то оценки для весовых коэффициентов можно получить из формул для выборочных моментов распределения:

$$DY \rightarrow S_Y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{Y})^2; \quad (16)$$

$$DX_i \rightarrow S_{X_i}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{X}_i)^2; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{cov}(Y, X_i) &\rightarrow C_m(Y, X_i) = \\ &= \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{Y})(x_{ik} - \bar{X}_i); \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} r(Y, X_i) &\rightarrow r_m(Y, X_i) = \\ &= \frac{\sum_{k=1}^m (y_k - \bar{Y})(x_{ik} - \bar{X}_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (y_k - \bar{Y})^2 (x_{ik} - \bar{X}_i)^2}}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\lambda_i^* = \frac{C_m(Y, X_i)}{S_{X_i}^2} = \frac{\sum_{k=1}^m (y_k - \bar{Y})(x_{ik} - \bar{X}_i)}{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{X}_i)^2}. \quad (20)$$

Вычисление матрицы парных ковариаций и корреляций. Матрица ковариаций

$$C = \left(c_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{X}_i)(x_{jk} - \bar{X}_j) \right)_{i,j=1}^n. \quad (21)$$

Матрица корреляций

$$R = \left(r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{X}_i)(x_{jk} - \bar{X}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{X}_i)^2 \sum_{k=1}^m (x_{jk} - \bar{X}_j)^2}} \right)_{i,j=1}^n. \quad (22)$$

ВЫВОДЫ

1. Выбор составляющих элементов транспортной опорной сети региона позволит повысить уровень транспортной доступности населенных пунктов и обеспечить транспортную мобильность населения. Особенно это актуально, когда планируется развитие региона на долгосрочную перспективу с привязкой к видам транспорта, объемам перевозки грузов и пассажиров.

2. Обоснована возможность применения аддитивной многокритериальной модели для:

- разработки метода обоснования включения проектируемой автомобильной дороги в опорную сеть региона;
- оценки эффективности опорной сети;
- оценивания коэффициентов качества сети муниципальных автомобильных дорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. Azemsha, S. A Method for Assessing the Automobiliation Impact on Population Morbidity / S. A. Azemsha // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. P. 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.037>.
2. Belyaev, A. I. Efficiency of Vehicle Operation / A. I. Belyaev, A. S. Afanasyev // *International Journal of Economics and Financial*. 2016. Vol. 6, Iss. 2. P. 24–30.
3. Pegin, P. P. Method to Assess Accident Psychological Severity in Drivers / P. P. Pegin, O. A. Pegina // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. P. 562–566. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.152>.
4. Балалаев, А. С. Транспортно-логистическое взаимодействие при мультимодальных перевозках: монография [Электронный ресурс] / А. С. Балалаев, Р. Г. Ле-

онтьев. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 268 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/tyrpfb>.

5. Красильщиков, И. М. Проектирование автомобильных дорог / И. М. Красильщиков, Л. В. Елизаров. М.: Транспортная компания, 2016. 215 с.
6. Пегин, П. А. Особенности транспортного планирования сети муниципальных автомобильных дорог с учетом климатических условий / П. А. Пегин, А. А. Ильин // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. Т. 73, № 2. С. 131–135.
7. Ilyin, A. Features Transport Planning the Network of Municipal Roads in Northern Region / A. Ilyin, P. Pegin, K. Semenova // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*. Singapore: Springer, 2020. Vol. 1. P. 397–401. (Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 49). https://doi.org/10.1007/978-981-15-0450-1_41.
8. Капский, Д. В. Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города / Д. В. Капский, Д. В. Навой, П. А. Пегин // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 1. P. 47–54. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54>.
9. Menukhova, T. A. Application of Methods of the Solution of Multi-Criteria Tasks for Choosing an Effective Cargo Delivery Scheme / T. A. Menukhova, A. S. Afanasyev // *International Journal of Economic Research*. 2017. Vol. 7, No 14. P. 87–94.
10. Pegin, P. The Effect of Sun Glare: Concept, Characteristics, Classification / P. Pegin, E. Sitnichuk // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 20. P. 474–479. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.077>.
11. Домке, Э. Р. Пути сообщения, технологические сооружения / Э. Р. Домке, Ю. М. Ситников, К. С. Подшивалова. М.: Изд. центр «Академия», 2013. 400 с.
12. Неруш, Ю. М. Транспортная логистика / Ю. М. Неруш, С. В. Саркисов. М.: Юрайт, 2016. 351 с.
13. Пегин, П. А. Улучшение сети муниципальных автомобильных дорог (на примере Ленинградской области) / П. А. Пегин, А. А. Ильин // *Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ПТГ2018: Материалы I Междунар. науч.-практ. конф. Липецк, 12–13 декабря 2018 г. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2018. Т. 2. С. 234–237.*
14. Скирковский, С. В. Разработка алгоритма и компьютерной программы оптимизации параметров функционирования городского маршрутизированного транспорта / С. В. Скирковский, П. А. Пегин // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. Т. 60, № 1. С. 277–287.

Поступила 15.06.2022

Подписана в печать 23.08.2022

Опубликована онлайн 29.07.2023

REFERENCES

1. Azemsha S., Kapski D., Pegin P. (2018) A Method for Assessing the Automobiliation Impact on Population Morbidity. *Transportation Research Procedia*, 36, 18–24 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.037>.

2. Belyaev A. I., Afanasyev A. S. (2016) Efficiency of Vehicle Operation. *International Journal of Economics and Financial*, 6 (2), 24–30.
3. Pegin P. P., Pegina O. A. (2018) Method to Assess Accident Psychological Severity in Drivers. *Transportation Research Procedia*, 36, 562–566. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.152>.
4. Balalayev A. S., Leont'ev R. G. (2012) *Transport and Logistics Interaction in Multimodal Transportation*. Moscow, Publishing House of Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport (Route). 268. Available at: <https://elibrary.ru/ryrpfb> (in Russian).
5. Krasilshchikov I. M., Yelizarov L. V. (2016) *Road Design*, Moscow, Transportnaya Kompaniya Publ. 215 (in Russian).
6. Pegin P. A., Ilyin A. A. (2019) Features of Transport Planning of the Network of Municipal Highways, Taking Into Account Climatic Conditions. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*, 73 (2), 131–135 (in Russian).
7. Ilyin A., Pegin P., Semenova K. Features Transport Planning the Network of Municipal Roads in Northern Region. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Vol. 1. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 49*. Singapore: Springer, 397–401. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0450-1_41.
8. Kapskiy D. V., Navoy D. V., Pegin P. (2019) Development of Model for Traffic Flows on Urban Street and Road Network. *Nauka i Technika = Science and Technique*, 18 (1), 47–54 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54>.
9. Menukhova T. A., Afanasyev A. S. (2017) Application of Methods of the Solution of Multi-Criteria Tasks for Choosing an Effective Cargo Delivery Scheme. *International Journal of Economic Research*, 7 (14), 87–94.
10. Pegin P., Sitnichuk E. (2017) The Effect of Sun Glare: Concept, Characteristics, Classification. *Transportation Research Procedia*, 20, 474–479. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.077>.
11. Domke E. R., Sitnikov Yu. M., Podshivalova K. S. (2013) *Communication Routes, Technological Facilities*. Moscow, Akademiya Publ. 400 (in Russian).
12. Nerush Yu. M., Sarkisov S. V. (2016) *Transport Logistics*. Moscow, Yurayt Publ. 351 (in Russian).
13. Pegin P. A., Ilyin A. A. (2018) Improving the Network of Municipal Roads (on the Example of the Leningrad Region). *Infokommunikatsionnye i Intellektual'nye Tekhnologii na Transporte IITT'2018: Materialy I Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Lipetsk, 12–13 Dekabrya 2018 g. T. 2* [Infocommunication and Intelligent Technologies in Transport IITT'2018: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference, December 12–13, 2018. Vol. 2. Lipetsk, Lipetsk State Technical University, 234–237 (in Russian).
14. Skirkovsky S. V., Pegin P. A. (2017) Development of an Algorithm and a Computer Program for Optimizing the Parameters of the Operation of Urban Routed Transport. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*, 60 (1), 277–287 (in Russian).

Received: 15.06.2022

Accepted: 23.08.2022

Published online: 29.07.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-308-316>

УДК 621.644.07

Применяемые изоляционные покрытия распределительных газопроводов в Республике Беларусь и их характеристика

Докт. техн. наук, проф. В. Н. Романюк¹⁾, Н. В. Струцкий²⁾

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

²⁾ГПО «Белтопгаз» (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Газораспределительная система – производственный комплекс, входящий в систему газоснабжения и состоящий из организационно и экономически взаимосвязанных объектов, предназначенных для организации снабжения газом непосредственно потребителей. В масштабах республики потребители – это 3,7 млн газифицированных квартир, более 9 тыс. коммунально-бытовых организаций непроизводственного характера и 4 тыс. промышленных предприятий с общим потреблением природного газа до 20 млрд м³ в год. Основу газораспределительной системы составляют около 67 тыс. км наружных распределительных газопроводов, 28 тыс. км из которых – это стальные газопроводы в подземном исполнении. К обеспечению защиты от коррозии стальных подземных распределительных газопроводов, как потенциально опасных объектов, предъявляются повышенные требования. Они, как правило, обеспечиваются комплексной антикоррозийной защитой, обязательной составляющей которой являются изоляционные покрытия. Учитывая изложенное, определение общих показателей, характеризующих состояние изоляции, степень ее износа, является актуальной задачей. Для ее решения впервые проанализирован массив многолетних статистических данных о дефектах защитных покрытий распределительных газопроводов, выявляемых приборным методом. Определены величины удельной плотности дефектов и повреждаемости для всех видов применяемых защитных покрытий. Наилучшие показатели выявлены у изоляции на основе термоусаживаемых лент. Определено характерное повреждение защитного покрытия на основе битумных мастик (микротрещины), которое возможно использовать в качестве индикатора старения данного вида изоляции. Показано, что дефектообразование в изоляционных покрытиях газопроводов до настоящего времени представляет собой, как правило, малоинтенсивный процесс, что подтверждено в том числе для длительно эксплуатируемых газопроводов. Полученные результаты вошли в обоснование отмены ранее применявшегося 40-летнего нормативного срока службы стальных газопроводов в новой редакции Правил по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь.

Ключевые слова: распределительные газопроводы, изоляционные покрытия, плотность дефектов, повреждаемость, целостность изоляции, техническое состояние, надежность

Для цитирования: Романюк, В. Н. Применяемые изоляционные покрытия распределительных газопроводов в Республике Беларусь и их характеристика / В. Н. Романюк, Н. В. Струцкий // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 308–316. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-308-316>

Applied Insulating Coatings for Gas Distribution Pipelines in the Republic of Belarus and Their Characteristics

V. N. Romaniuk¹⁾ N. V. Strutsky²⁾

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

²⁾Beltopgaz SPA (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Gas distribution system is a production complex, which is part of the gas supply system and consists of organizational and economically interconnected facilities designed to organize the supply of gas directly to consumers. On the national

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

scale, consumers are 3.7 million gasified apartments, more than 9 thousand communal and household non-productive organizations and 4 thousand industrial enterprises with a total consumption of natural gas up to 20 billion m³ per year. The basis of the gas distribution system is formed by about 67.0 thousand km of external distribution gas pipelines, 28.0 thousand km of which are underground steel pipelines. As potentially hazardous objects, steel underground distribution pipelines are subject to higher requirements for corrosion protection. As a rule, they are provided with complex anticorrosion protection, an obligatory component of which is insulation coatings. Taking into account the above mentioned, the definition of general indicators characterizing condition of insulation, the degree of its wear is an actual task. To solve it, for the first time, we have analyzed an array of long-term statistical data on defects of protective coatings of distribution gas pipelines, detected by instrumental method. The values of specific defect density D_d and damageability A_d have been determined for all types of applied protective coatings. The best values have been found for insulation on the basis of heat-shrinkable tapes. The characteristic damage of the protective coating on the basis of bituminous mastics (microcracks), which can be used as an indicator of aging of this type of insulation, has been determined. It has been shown that defect formation in the insulation coatings of gas pipelines up to the present time is, as a rule, a low-intensive process, which has been confirmed, among other things, for gas pipelines operated for a long time. The obtained results were included into the justification of abolition of the previously used 40-year normative service life of steel gas pipelines in the new edition of the Rules of Technical Safety in the Field of Gas Supply of the Republic of Belarus.

Keywords: gas distribution pipelines, insulation coatings, defect density, damageability, insulation integrity, technical condition, reliability

For citation: Romaniuk V. N., Strutsky N. V. (2023) Applied Insulating Coatings for Gas Distribution Pipelines in the Republic of Belarus and Their Characteristics. *Science and Technique*. 22 (4), 308–316. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-308-316> (in Russian)

Введение

В Республике Беларусь эксплуатируется с превышением ранее применявшегося 40-летнего нормативного срока службы около 20 % стальных газопроводов. Признаков старения трубного металла, выраженных в ощутимом снижении его физико-механических свойств или деградациии внутренней структуры, в газораспределительной системе страны до сих пор не наблюдается [1]. На настоящем этапе возрастной фактор пока не относится к значимым.

Исторически сложилось так, что стальные газопроводы (зачастую обладающие за счет высокого внутреннего давления и больших диаметров повышенной пропускной способностью и несущие основную нагрузку по расходам газа) – одновременно и наиболее длительно эксплуатируемая, и наиболее ответственная часть газораспределительной сети. Это связано со значительно более поздним внедрением труб из полиэтилена в широкую практику строительства (начало 2000-х гг.), а также существовавшими ранее ограничениями для полиэтиленовых газопроводов по давлению газа (не более 0,6 МПа, а на территории населенных пунктов – не более 0,3 МПа).

Исходя из опыта эксплуатации, фактором, обладающим наибольшим потенциалом влияния на техническое состояние стальных подземных распределительных газопроводов, яв-

ляются коррозионные процессы различного происхождения. В силу своего назначения распределительные газопроводы доходят непосредственно до потребителя и значительная часть их протяженности приходится на территории населенных пунктов и промышленных зон, где плотность потребителей и объемы потребления выше. Повсеместная прокладка в условиях плотной застройки, насыщенности подземными коммуникациями, промышленных и коммунальных воздействий и загрязнений дополнительно усложняет коррозионную обстановку.

В этой связи к обеспечению защиты от коррозии стальных подземных распределительных газопроводов традиционно предъявляются повышенные требования. Для этого, как правило, используются пассивная и активная (электрохимическая) составляющие в комплексе. Таким образом, техническое и функциональное состояние защитных элементов имеет прямое влияние на общую надежность газопроводов и должно в обязательном порядке учитываться в процессе их диагностирования.

В этих целях следует установить общие показатели, характеризующие эффективность и ресурс работы изоляции и электрохимической защиты. Такие показатели необходимы для непосредственной оценки общего состояния газораспределительной системы, а также дадут

возможность сравнительного анализа при оценке отдельных объектов системы.

Изоляционное покрытие является базовым уровнем защиты, так как функционирует в нерегулируемом режиме, но в то же время само непосредственно влияет на режим работы электрохимической защиты (ЭХЗ). Поэтому определение общих показателей, характеризующих состояние изоляции, степень ее износа, является первоочередной задачей.

Основная часть

Все без исключения стальные подземные распределительные газопроводы в Беларуси на всем протяжении обеспечены защитными покрытиями усиленного типа (весьма усиленного типа по ранее принятой терминологии) [2, 3].

Используются как традиционные покрытия (на основе битумных мастик, полимерных липких лент холодного нанесения), так и более современные: начиная с 2003 г. при строительстве стальных подземных газопроводов в республике применяются наилучшие по своим характеристикам покрытия на основе экструдированного полиэтилена и термоусаживающихся лент. Вместе с тем, учитывая, что к тому моменту пик строительства стальных газопроводов уже прошел, доля таких покрытий составляет около 11 %. Распространенность различных видов применяемой изоляции показана на рис. 1.

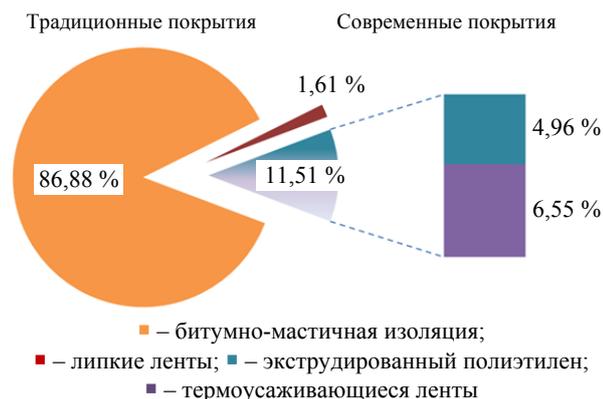


Рис. 1. Структура пассивной защиты газопроводов по видам применяемых покрытий

Fig. 1. Structure of passive protection of gas pipelines by types of applied coatings

Кроме указанных выше покрытий, свое применение на распределительных газовых сетях нашли рулонные мастично-полимерные

материалы различных производителей, конструктивно состоящие из изоляционного мастично-полимерного слоя и полимерной ленты. Но поскольку данные материалы используются в основном для местного ремонта выявляемых повреждений изоляции, их доля в общей протяженности не велика.

Изоляция является защитным, вспомогательным элементом стального подземного газопровода. Проиллюстрируем ее место в обеспечении надежного функционирования стального подземного газопровода с помощью так называемой блок-схемы надежности (reliability block diagram, RBD), определив те элементы, отказ которых вызывает отказ системы (последовательное соединение), и те элементы, отказ которых приводит лишь к увеличению вероятности отказа системы (параллельное соединение) [4].

Блок-схема для стального подземного газопровода будет иметь последовательно-параллельное построение (рис. 2).

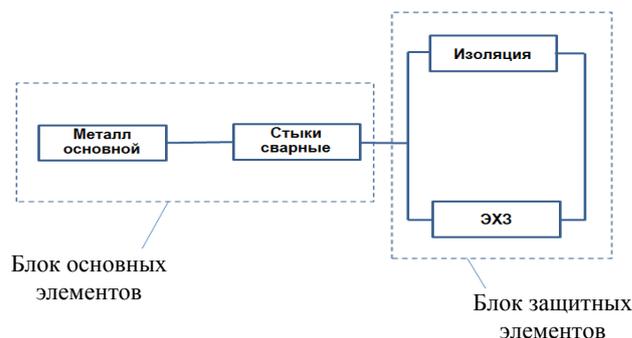


Рис. 2. Блок-схема надежности газопровода

Fig. 2. Gas pipeline reliability block diagram

Строго говоря, даже одновременный отказ всего защитного блока в действительности не означает немедленного и безусловного отказа газопровода, вероятностная задача определения надежности газопровода значительно сложнее, чем это можно представить, исходя из представленной схемы.

Вместе с тем данная модель дает необходимый уровень приближения, чтобы проиллюстрировать два основных момента. Во-первых, несмотря на физическое соединение, сцепление с поверхностью стального трубопровода, изоляционное покрытие является отдельным элементом системы, так как выполняет самостоя-

тельную функцию и имеет свои, специфические физические свойства и конструкцию. Во-вторых, изоляционное покрытие функционирует параллельно с электрохимической защитой – повреждение защитного покрытия, пока под ним нет коррозии металла, никак не влияет ни на работоспособность, ни на исправность основных элементов газопровода. При снижении защитных свойств изоляционного покрытия катодный потенциал успешно препятствует растворению металла в грунте (естественно, расход защитного тока при этом увеличивается).

Следует особо отметить, что поскольку коррозия стали является электрохимическим процессом, тормозящее влияние на нее может достигаться именно и только внешними электрическими (или электромагнитными) полями, формируемыми ЭХЗ. Роль изоляции состоит в максимально возможном снижении площади оголенной поверхности стального трубопровода, прямо контактирующей с коррозионной агрессивной средой (так называемый контакт «труба–земля») [5]. Таким образом, целостность (сплошность) следует отнести к одной из ключевых характеристик защитного покрытия.

Ценным источником информации для понимания степени и динамики изменения целостности изоляции газопроводов в ходе эксплуатации является массив многолетних статистических данных о дефектах покрытия, выявляемых в ходе периодического приборного обследования. Данный вид эксплуатационного контроля включает в себя выявление мест утечек газа и повреждений изоляционного покрытия приборными методами, без вскрытия трубопровода.

При этом достигается высокая чувствительность контроля: заявляемая минимальная площадь определяемого повреждения изоляции газопровода для современных приборов составляет до 10 мм^2 , точность определения места дефекта – 0,5 м.

Периодическое приборное обследование газопроводов, как правило, проводится каждые пять лет. Некоторые характерные участки газопроводов могут обследоваться чаще: раз в три года (переходы через судоходные водные преграды), или даже ежегодно (например, пересе-

чения с автомобильными и железными дорогами). Все выявленные дефекты изоляции подлежат обязательному устранению в сроки от одного до трех месяцев [6]. При ремонте осуществляются непосредственное наблюдение, изучение и документирование дефектов.

Таким образом, накапливается значительный объем данных, в том числе на протяжении ряда последних лет – с использованием возможностей специализированных программных комплексов [7].

Итак, обобщим результаты приборного обследования газопроводов с 2010 по 2022 г. За этот период каждый объект прошел не менее двух циклов обследования, при общей протяженности стальных подземных газопроводов 28 тыс. км, протяженность обследованных газопроводов составила 85,7 тыс. км.

Рассмотрим газораспределительную сеть республики как совокупность типовых объектов – газопроводов, а всю совокупность изоляционных покрытий газопроводов – как ее отдельный большой элемент. Учитывая примерно постоянные годовые объемы приборного обследования на уровне 6,5–7,0 тыс. км, ежегодно контролю сплошности изоляции подвергается до 25 % газораспределительной сети, что предоставляет надежную статистическую базу.

Для оценивания динамики сохранения сплошности изоляционного покрытия в процессе эксплуатации целесообразно исходить из степени его повреждаемости (дефектности, A_d – ability of defects). Определим удельную повреждаемость как среднее число повреждений элемента (участка газопровода определенной протяженности) в год. Она будет равна величине, обратной среднему промежутку времени между повреждениями одного элемента. Характеризовать повреждаемость будем через относительное распределение выявляемых дефектов изоляции по длине трубопровода, то есть удельную плотность дефектов на единицу длины контролируемого участка (D_d – defect density). Данные показатели напрямую характеризуют целостность защитных покрытий, позволяя провести дальнейший продуктивный анализ [8].

Полученные результаты представлены на рис. 3.

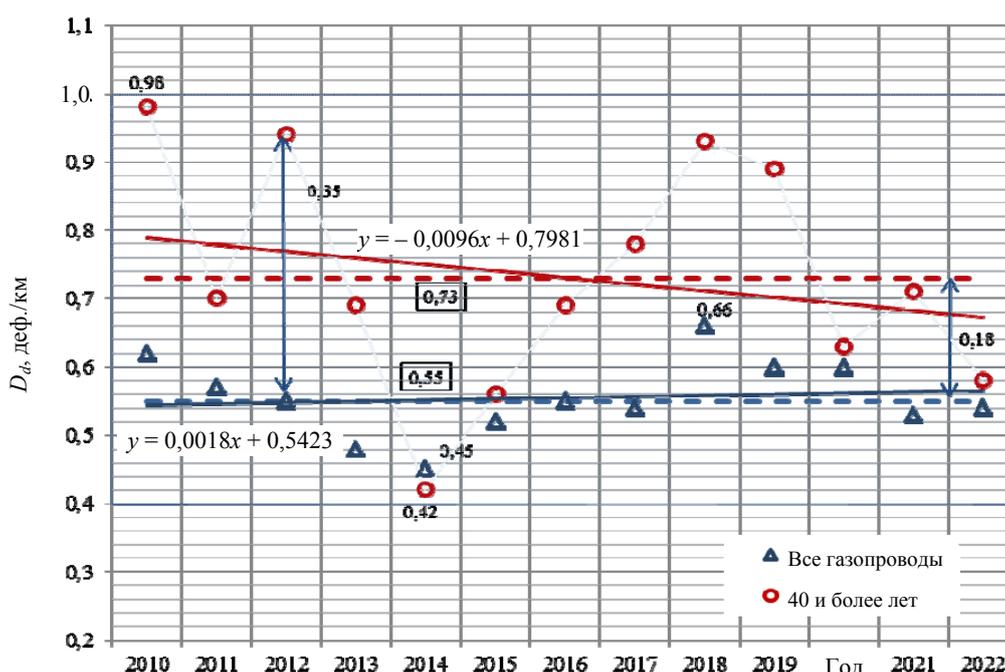


Рис. 3. Анализ годовых плотностей дефектов изоляционного покрытия

Fig. 3. Analysis of annual of insulating coating defects

Как видно на рис. 3, значения плотности дефектов защитных покрытий стальных распределительных газопроводов, взятых по всей протяженности, находятся в диапазоне от 0,45 до 0,66 деф./км, средняя повреждаемость (штриховая линия) составляет 0,55 деф./км. Значения плотности изоляции на длительно эксплуатируемых газопроводах со сроком службы 40 лет и более находятся в диапазоне от 0,42 до 0,98 деф./км, средняя повреждаемость составляет 0,73 деф./км.

Максимальное превышение плотности дефектов покрытия для газопроводов, выработавших нормативный срок службы, над общим уровнем зафиксировано в 2012 г. и составило 0,35 деф./км. Разница между средней повреждаемостью защитных покрытий по всей протяженности стальных распределительных газопроводов и для газопроводов старше 40 лет составляет всего 0,18 деф./км. Вся полоса значений плотности дефектов защитного покрытия полностью укладывается в диапазон от 0,4 до 1,0 деф./км.

Для оценки полученных данных воспользуемся действующим отраслевым документом ГПО «Белтопгаз» по техническому диагностированию газопроводов [9]. Согласно принятой методике, для удобства работы на реальных объектах, обычно имеющих протяженность от нескольких сотен метров до нескольких кило-

метров, газопровод при обследовании и дальнейшем оценивании изоляции условно делится на стометровые участки. Принятая градация предусматривает оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно» в зависимости от количества выявленных дефектов (табл. 1).

Таблица 1

Оценка состояния защитного покрытия в зависимости от количества повреждений
Assessment of the state of the protective coating depending on the amount of damage

Количество мест повреждения изоляции, обнаруженных приборами при проверке газопровода без вскрытия грунта на каждом стометровом участке	Локальная оценка по каждому стометровому участку
0–1	«Отлично»
2–3	«Хорошо»
4–8	«Удовлетворительно»
Свыше 8	«Неудовлетворительно»

Для характеристики изоляционных покрытий на уровне целой газораспределительной системы удобнее оперировать величинами с размерностью дефект на километр. Тогда оценка «отлично» изоляции будет предполагать не более 10 деф./км, «хорошо» – 30, «удовлетворительно» – 80 деф./км, при превышающем данный предел количестве повреждений покрытие будет признано негодным.

В соответствии с данной градацией оценивания даже верхняя граница плотности дефектов (~1,0 деф./км) характеризует защитные покрытия как исправные (оценка «отлично»), причем с большим запасом. Если исходить из критерия сохранения работоспособного состояния (оценка «удовлетворительно»), максимальное значение D_d составит всего 1,23 % от допустимой области значений 80 деф./км.

Поскольку образование дефектов изоляционных покрытий газопроводов до настоящего времени представляет собой равномерно развивающийся во времени процесс, для получения математической модели, выражающей общую тенденцию (тренд) изменения уровня временного ряда плотности дефектов изоляции, его аналитическое выравнивание проведено по линейной функции. Для расчета аппроксимации использован табличный процессор Excel.

Как видно, оба тренда (сплошные линии на рис. 3) как для защитных покрытий в целом, так и для изоляции газопроводов старше 40 лет имеют незначительные коэффициенты регрессии, демонстрируя стабильность технического состояния изоляционных покрытий газопроводов во времени.

Для проверки и подтверждения полученных результатов воспользуемся методикой определения оценки технического состояния зданий и сооружений, строительных конструкций и инженерных систем, согласно [10]. Здесь повреждаемость элемента характеризуется степенью распространения дефектов. Данный показатель имеет следующую градацию: единичные дефекты – занимающие 10 % и менее площади, линейного размера или количества; многочисленные дефекты – от 10 до 40 %; массовые дефекты – более 40 %.

Приняв из практики (с запасом) эквивалентную длину участка повреждения защитного покрытия $l_{\text{экв}} = 2$ м (стандартная длина шурфа), при максимальной достигнутой плотности дефектов 0,98 деф./км получаем 1,96 % от принятого линейного размера участка газопровода 1 км. По степени распространения это единичные дефекты.

Результаты оценки повреждаемости изоляции стальных подземных распределительных газопроводов, согласно [9] и [10], показаны на рис. 4.

Далее, в соответствии с методикой [10], исходя из степени распространения дефектов, их класса и степени ответственности элемента (табл. 2), определяется категория технического состояния (КТС). Всего документом устанавливается пять категорий – от I до V, в порядке увеличения степени износа и снижения работоспособности.

Таблица 2

Определение категории технического состояния конструкции [10]
Determination of the category of thermal resistance of the structure [10]

Дефекты по степени распространения	КТС для класса дефектов		
	1 (критические)	2 (значительные)	3 (малозначительные)
Массовые	$\frac{V}{IV, V}$	$\frac{IV, V}{III}$	$\frac{III}{II, III}$
Многочисленные	$\frac{V}{IV}$	$\frac{IV}{II, III}$	$\frac{II, III}{II}$
Единичные	$\frac{IV, V}{III, IV}$	$\frac{III}{II}$	$\frac{II}{I}$

Примечание. В числителе приведены КТС для элементов степени ответственности 1, в знаменателе – для элементов степени ответственности 2.

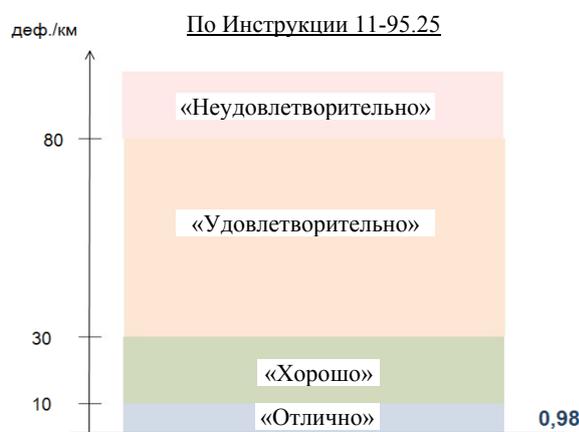


Рис. 4. Общая оценка степени износа (потери сплошности) изоляционных покрытий

Fig. 4. General assessment of the degree of wear (loss of continuity) of insulation coatings

Учитывая вспомогательную функцию защитного покрытия, его повреждения необходимо относить к классу малозначительных либо, в худшем случае (при отсутствии ЭХЗ и влиянии дополнительных негативных факторов), к классу значительных дефектов, степень ответственности элемента – 2. В первом случае защитное покрытие соответствует I, наивысшей категории технического состояния (исправное состояние). Во втором – покрытие соответствует II категории КТС (работоспособное состояние): имеющиеся дефекты не приводят к нарушению работоспособности конструкции в данных конкретных условиях эксплуатации, но в перспективе могут снизить ее долговечность.

Отдельно рассмотрим битумно-мастичную изоляцию, применявшуюся в газораспределительной системе Беларуси с 1958 по 2003 г. и остающуюся для стальных распределительных газопроводов преобладающим, а для газопроводов старше 40 лет – практически единственным видом наружного защитного покрытия. Именно для битумно-мастичной изоляции вопрос оценки и прогнозирования технического состояния стоит наиболее остро [11].

Это многослойное армированное покрытие, в котором сцепление слоев и адгезия к поверхности трубы обеспечиваются нагреванием битумной мастики до состояния плавления. По опыту эксплуатации можно указать тип дефекта, характерный именно для данного вида изоляции и наиболее связанный с деградацией внутренней структуры покрытия вследствие температурных и механических воздействий,

возрастного охрупчивания. Это – микротрещины. Распространенность микротрещин, их долю в общем количестве повреждений, а особенно динамику изменения удельной плотности во времени можно принять в качестве характерного показателя (индикатора) старения изоляции на основе битумных мастик [11].

Динамика годовых плотностей дефектов битумно-мастичной изоляции с выделением микротрещин показана на рис. 5.

Удельная плотность дефектов для битумно-мастичной изоляции стальных распределительных газопроводов ГПО «Белтопгаз» до настоящего времени практически остается в диапазоне значений от 0,48 до 0,71 деф./км, плотность микротрещин находится в диапазоне от 0,09 до 0,16 деф./км. Если средняя повреждаемость для битумно-мастичной изоляции составляет 0,6 деф./км·год, то доля микротрещин 0,12 деф./км·год (20 %).

Аппроксимация временного ряда показывает, что распространенность микротрещин не имеет тенденции к росту, сохраняя стабильность. Таким образом, принятая периодичность приборного обследования газопроводов и практика обязательного устранения выявляемых дефектов пока позволяют в значительной степени нивелировать негативные эффекты естественного старения покрытий.

Сравнение средних значений повреждаемости для различных видов применяемой изоляции (на основе битумных мастик, липких лент холодного нанесения, термоусаживаемых лент, экструдированного полиэтилена) представлено на рис. 6.

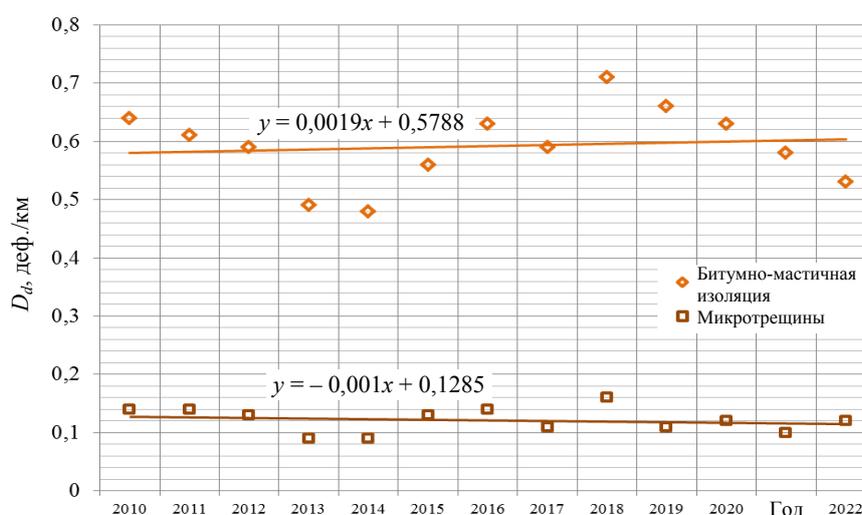


Рис. 5. Анализ годовых плотностей дефектов битумно-мастичной изоляции с выделением микротрещин
 Fig. 5. Analysis of annual densities of defects in bitumen-mastic insulation with identification of microcracks

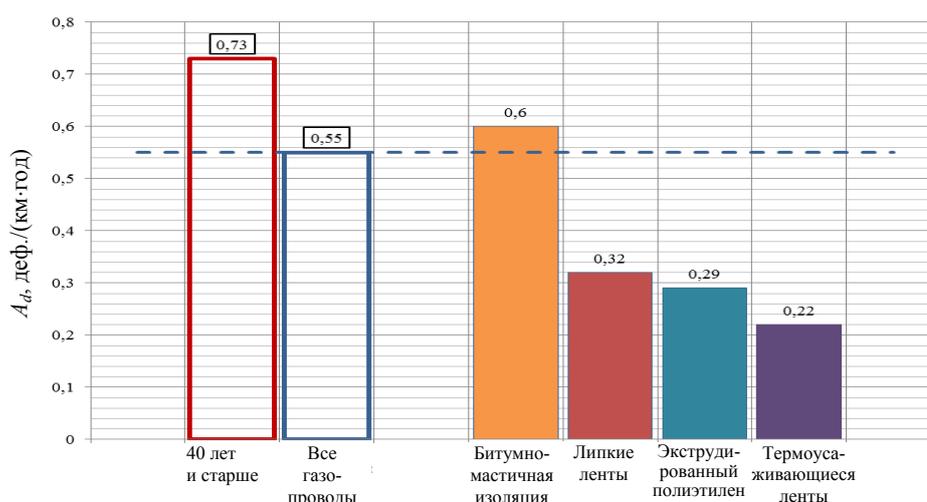


Рис. 6. Средняя повреждаемость различных видов защитных покрытий

Fig. 6. Average damage to various types of protective coatings

Как видно, средние значения повреждаемости для полимерных защитных покрытий ниже, чем для битумно-мастичной изоляции. Вместе с тем следует учитывать, что и средний возраст эксплуатируемых полимерных покрытий значительно ниже.

Наименьшие значения повреждаемости ($A_d = 0,22$ деф./.(км·год)) по результатам приборного обследования демонстрируют защитные покрытия на основе термоусаживаемых лент. Несколько неожиданными выглядят достаточно хорошие показатели для изоляции на основе липких лент, учитывая неоднозначный опыт эксплуатации подобных покрытий трассового нанесения на магистральных трубопроводах 1980-х гг. постройки. По-видимому, определяющим фактором здесь является то, что при строительстве распределительных газопроводов использовались трубы, изолированные в базовых условиях.

В любом случае, все виды покрытий демонстрируют высокую степень сохранения целостности в процессе эксплуатации. Полученные общие значения параметров плотности дефектов D_d и средней повреждаемости A_d изоляционных покрытий с учетом их вида и срока службы могут использоваться как для общей оценки состояния газораспределительной системы, так и для сравнительного анализа с частными показателями конкретных объектов при их диагностировании.

ВЫВОДЫ

1. Впервые выполнен анализ многолетних данных о повреждениях изоляции стальных подземных распределительных газопроводов, кото-

рый позволил через показатель плотности дефектов определить степень повреждаемости (дефектности) защитных покрытий. Вся полоса значений плотности дефектов полностью укладывается в диапазон от 0,4 до 1,0 деф./км. Средняя повреждаемость изоляции стальных подземных газопроводов составляет 0,55 деф./.(км·год), для газопроводов старше 40 лет – 0,73 деф./.(км·год).

2. Значения повреждаемости также определены для всех видов применяемых покрытий. Наилучший показатель выявлен у изоляции на основе термоусаживаемых лент – 0,22 деф./.(км·год).

3. Определено характерное повреждение защитного покрытия – микротрещины, которое возможно использовать в качестве индикатора старения изоляции на основе битумных мастик.

4. Полученные результаты демонстрируют незначительный уровень износа защитных покрытий стальных подземных распределительных газопроводов в масштабах республики, исходя из такой ключевой характеристики, как целостность (сплошность) покрытия. Полученные результаты вошли в обоснование отмены ранее применявшегося 40-летнего нормативного срока службы стальных газопроводов в новой редакции Правил по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь [6].

5. Предыдущий вывод верен для изоляции газопроводов с длительными сроками эксплуатации, а также для всех видов покрытий, включая традиционные битумно-мастичную изоляцию и липкие ленты.

6. Общее состояние изоляции стальных подземных распределительных газопроводов, согласно [9], должно быть оценено как отличное. Согласно [10], общее состояние покрытий необходимо отнести к I категории КТС (исправное состояние) либо (при отсутствии ЭХЗ и влиянии дополнительных негативных факторов) – ко II категории КТС (работоспособное состояние).

7. Полученные общие значения параметров плотности дефектов D_d и средней повреждаемости A_d изоляционных покрытий с учетом их вида и срока службы могут использоваться для сравнительного анализа с частными показателями конкретных объектов диагностирования в рамках как детерминистских, так и стохастических расчетных методик.

ЛИТЕРАТУРА

1. О возможности продления срока службы труб распределительных газопроводов с учетом изменений их структуры и основных механических свойств / А. П. Андриевский [и др.] // Энергетическая стратегия. 2022. № 4. С. 32–35.
2. ГОСТ 9.602–1989. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт СССР, 1989. 59 с.
3. ГОСТ 9.602–2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2016. 87 с.
4. Справочник по надежности / под ред. Л. М. Якименко, М.: Мир, 1970. Т. 3. 376 с.
5. Пригула, В. В. Современные проблемы защиты от подземной коррозии / В. В. Пригула // Коррозия территории «Нефтегаз». 2012. № 3 (23). С. 18–21.
6. Правила обеспечения промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь: утв. М-вом по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь 05.12.2022 № 66. Минск: Энергопресс, 2023. 280 с.
7. Струцкий, Н. В. Применение мобильных устройств в работе газовых хозяйств Беларуси / Н. В. Струцкий, А. А. Ананенко, И. М. Перельгин, О. В. Голубева // Энергетическая стратегия. 2018. № 5 (66). С. 32–34.
8. Романюк, В. Н. Оценка общего уровня повреждаемости изоляционных покрытий стальных подземных газопроводов / В. Н. Романюк, Н. В. Струцкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. 2022. № 14. С. 71–77.
9. Инструкция по оценке технического состояния подземных газопроводов, выработавших нормативный срок службы 11-95.25 // Защита и оценка технического состояния систем газоснабжения: сборник локальных нормативных правовых актов. Минск: Минсктипроект, 2006. С. 162–190.
10. СН 1.04.01–2020. Техническое состояние зданий и сооружений. Минск: Стройтехнорм, 2021. 68 с.
11. Струцкий, Н. В. Анализ эксплуатационных дефектов изоляционного покрытия распределительных газопроводов и дальнейшая оценка его технического состояния [Электронный ресурс] / Н. В. Струцкий // Энергетика Беларуси-2022: материалы Респ. науч.-практ. конф., 25–26 мая 2022 г. / сост. И. Н. Прокопеня. Минск: БНТУ, 2022. С. 65–69. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/121684>.

Поступила 11.04.2023

Подписана к печати 20.06.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Andrievsky A. P., Shtempel O. P., Yanushonok A. N., Chukhnov A. A. (2022) On the Possibility of Extending the Service Life of Pipes of Distribution Gas Pipelines, Taking Into Account Changes in their Structure and Basic Mechanical Properties. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (4), 32–35 (in Russian).
2. State Standard 9.602–1989. *Unified System of Protection Against Corrosion and Ageing. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Publishing House of USSR Gosstandart, 1989. 59 (in Russian).
3. State Standard 9.602–2016. *Unified System of Protection Against Corrosion and Ageing. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 87 (in Russian).
4. Yakimenko L. M. (ed.) (1970) *Reliability Handbook*. Vol. 3. Moscow, Mir Publ. 376 (in Russian).
5. Pritula V. V. (2012) Modern Problems of Protection Against Underground Corrosion. *Korroziya Territorii "Neftegaz"* [Corrosion of the Neftegaz Territory], (3), 18–21 (in Russian).
6. Industrial Safety Rules in the Field of Gas Supply of the Republic of Belarus. Minsk, 2017. 218 (in Russian).
7. Strutsky N. V., Anannenko A. A., Perelygin I. M., Golubeva O. V. (2018) The use of Mobile Devices in the Work of Gas Facilities in Belarus. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (5), 32–34 (in Russian).
8. Romanyuk V. N., Strutsky N. V. (2022) Estimation of the General Level of Damageability of Insulating Coatings of Steel Underground Gas Pipelines. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, (14), 71–77 (in Russian).
9. Instructions for Assessing the Technical Condition of Underground Gas Pipelines that Have Reached their Standard Service life 11-95.25. Protection and Assessment of the Technical Condition of Gas Supply Systems. Collection of Local Regulatory Legal Acts. Minsk, Minsktiproekt Publ., 2006, 162–190 (in Russian).
10. SN [Building Norms] 1.04.01–2020. *Technical Condition of Buildings and Structures*. Minsk, Stroytekhnorm Publ., 2021. 68 (in Russian).
11. Strutsky N. V. (2022) Analysis of Operational Defects of Insulating Coating of Gas Distribution Pipelines and Further Assessment of its Technical Condition. *Energetika Belarusi-2022: Materialy Resp. Nauch.-Prakt. Konf., 25–26 Maya 2022 g.* [Energy of Belarus-2022: Proceedings of Republican Scientific and Practical Conference, 25–26 may 2022]. Minsk, Belarusian National Technical University, 65–69. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/121684> (in Russian).

Received: 11.04.2023

Accepted: 20.06.2023

Published online: 31.07.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325>

УДК 621.316.925

Принципы выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. А. Романюк,
канд. техн. наук, доц. В. Ю. Румянцев¹⁾,
канд. техн. наук Ю. В. Румянцев¹⁾, канд. техн. наук, доц. Е. А. Дерюгина¹⁾,
инж. П. И. Климович¹⁾

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

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

Реферат. В существующих микропроцессорных направленных токовых защитах линий от междуфазных коротких замыканий используются цифровые органы направления мощности, включаемые, как правило, на полные токи и напряжения по так называемой 90-градусной схеме. При данной схеме включения «мертвая» зона появляется только при близких к месту установки защиты трехфазных коротких замыканиях, составляющих небольшую долю всех возможных видов таких повреждений. Тем не менее ее наличие является существенным недостатком органов направления мощности. Рассмотрены принципы выполнения органа на основе цифровых операций с ортогональными составляющими подводимых напряжений и тока. Результат функционирования органа направления мощности сводится к выработке информационного признака, равного: единице – при прямом направлении мощности; минус единице – при ее обратном направлении. Для устранения «мертвой» зоны организована работа органа с использованием «памяти» напряжения. С целью получения требуемой длительности «памяти» реализована частотная компенсация. Исследование эффективности принятых решений, а также поведения органа направления мощности в нормальном и аварийных режимах выполнено методом вычислительного эксперимента. В системе динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems разработаны модели электрической системы и цифрового органа направления мощности. Результаты исследований показали, что совместное использование существующих и предложенных принципов выполнения цифрового органа направления мощности обеспечивает повышение его технического совершенства и позволяет устранить «мертвую» зону с сохранением его устойчивого функционирования в течение сколь угодно длительного промежутка времени.

Ключевые слова: цифровой орган направления мощности, ортогональные составляющие, цифровые фильтры Фурье, микропроцессорная токовая направленная защита, работа по «памяти», угол максимальной чувствительности, MATLAB-Simulink-SimPowerSystems

Для цитирования: Принципы выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 317–325. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325>

Principles for Implementation of Digital Power Direction Control in Microprocessor Current Protections

F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, A. A. Dziaruhina¹⁾, P. I. Klimkovich¹⁾

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

Abstracts. In the existing microprocessor-based directional current protection lines from phase-to-phase short circuits, digital power direction elements are used, which, as a rule, are switched on at full currents and voltage according to the so-called 90-degree

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

pattern. With this switching scheme, a “dead” zone appears only in case of three-phase short circuits close to the protection installation site, which make up a small fraction of all possible types of such damage. Nevertheless, its presence is a significant drawback of the power direction organs. The principles of organ execution based on digital operations with orthogonal components of input voltages and currents have been considered. The result of the functioning of the power direction body is reduced to the development of an information sign equal to: one – with the direct direction of power; minus one – when it is in the opposite direction. To eliminate the “dead” zone, the work of the organ is organized using the voltage “memory”. In order to obtain the required duration of the “memory”, frequency compensation is implemented. The study of the effectiveness of the decisions made, as well as the behavior of the power direction control in normal and emergency modes, has been carried out by the method of a computational experiment. In the MATLAB-Simulink-SimPowerSystems dynamic simulation system, models of the electrical system and a digital power direction control have been developed. The results of the research have shown that the joint use of the existing and proposed principles for the implementation of a digital power direction control ensures an increase in its technical perfection and eliminates the “dead” zone while maintaining its stable operation for an arbitrarily long period of time.

Keywords: digital power direction control, orthogonal components, Fourier digital filters, microprocessor current directional protection, work from memory, maximum sensitivity angle, MATLAB-Simulink-SimPowerSystems

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Klimkovich P. I. (2023) Principles for Implementation of Digital Power Direction Control in Microprocessor Current Protections. *Science and Technique*. 22 (4), 317–325. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325> (in Russian)

Введение

В микропроцессорных токовых направленных защитах линий электропередачи от междофазных коротких замыканий (КЗ) используются цифровые органы направления мощности (ОНМ), включаемые, как правило, на полные токи и напряжения [1]. Наиболее рациональной при этом признается так называемая 90-градусная схема, в которой к обмотке однофазного ОНМ подводится линейное напряжение двух фаз и фазный ток третьей фазы. При данной схеме включения «мертвая» зона может появляться только при близких к месту установки защиты трехфазных КЗ, составляющих небольшую долю всех возможных видов таких повреждений. Тем не менее ее наличие является существенным недостатком ОНМ.

В существующих микропроцессорных защитах ОНМ представляет собой «направленное» цифровое реле, которое не срабатывает при КЗ вне зоны действия защиты и срабатывает, когда КЗ возникает в «прямом» направлении, т. е. в направлении зоны работы защиты [2].

Для определения указанного направления современные ОНМ используют фазовый угол между подводимыми к нему напряжением и током КЗ [3].

Следует отметить, что непосредственный расчет фаз напряжения и тока для вычисления этого угла не является удобным вследствие необходимости получения двух обратных тригонометрических функций. Более рациональным представ-

ляется метод анализа векторных соотношений соответствующих величин с использованием их ортогональных составляющих (ОС) [4].

Теоретические предпосылки

В основе определения направления мощности по ОС подводимых к ОНМ напряжению и току лежат следующие теоретические положения.

Для получения условия срабатывания ОНМ воспользуемся приведенной на рис. 1 векторной диаграммой при 90-градусной схеме включения, где \vec{U} – вектор подводимого линейного напряжения двух фаз, начальная фаза которого ϕ_u ; \vec{I} – то же подведенного фазного тока с начальной фазой ϕ_i . Вектор $\vec{U}e^{\phi_{мч}}$ образован путем поворота вектора \vec{U} на угол $\phi_{мч}$, называемый углом максимальной чувствительности ОНМ, который обеспечивает достоверное определение направления мощности при минимальных значениях напряжения и тока.

Направление мощности определяется по нахождению угла Ψ между векторами \vec{I} и $\vec{U}e^{\phi_{мч}}$

$$\Psi = \phi_u - \phi_i - \phi_{мч} \quad (1)$$

в соответствующем диапазоне.

Если $-\frac{\pi}{2} < \Psi < \frac{\pi}{2}$, то направление мощности прямое и ОНМ должен срабатывать, в противном случае мощность имеет обратное направление, а ОНМ подлежит блокировке.

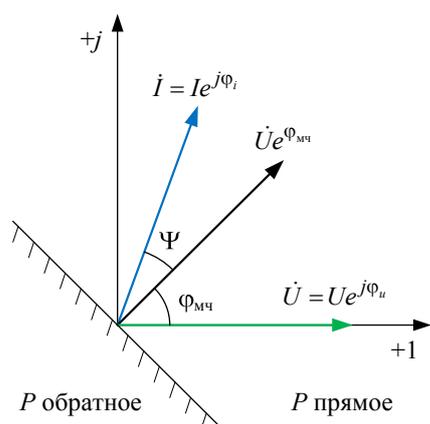


Рис. 1. Векторная диаграмма органов направления мощности при 90-градусной схеме включения

Fig. 1. Vector diagram of power direction control at 90-degree switching circuit

Для фиксации нахождения Ψ в указанном диапазоне можно использовать значение $\cos\Psi$, которое, как вытекает из (1), определяется по выражению

$$\cos\Psi = (\cos\phi_u \cos\phi_i + \sin\phi_u \sin\phi_i) \cos\phi_{мч} + (\sin\phi_u \cos\phi_i - \cos\phi_u \sin\phi_i) \sin\phi_{мч}. \quad (2)$$

Для определения направления мощности достаточно знать знак косинуса угла Ψ . Поэтому в качестве информационного параметра, позволяющего фиксировать указанное направление, можно использовать признак

$$P = \text{sign}(\cos\Psi) \cdot 1. \quad (3)$$

Принимая во внимание [5], что $\cos\phi_u = \frac{u_c}{U_m}$,

$\sin\phi_u = \frac{u_s}{U_m}$, $\cos\phi_i = \frac{i_c}{I_m}$, $\sin\phi_i = \frac{i_s}{I_m}$, после их подстановки в (2) получим

$$\cos\Psi = \frac{1}{U_m I_m} (u_c i_c + u_s i_s) \cos\phi_{мч} + \frac{1}{U_m I_m} (u_s i_c - u_c i_s) \sin\phi_{мч}, \quad (4)$$

где U_m, I_m – амплитудные значения напряжения и тока соответственно; $u_c, i_c; u_s, i_s$ – мгновенные значения соответственно косинусных и синусных ОС напряжения и тока.

Переходя от непрерывных величин в выше-приведенных выражениях к их выборкам в дискретные моменты времени t_n ($n = 1, 2, \dots, N$), руководствуясь (3), (4) и учитывая, что $U_m I_m > 0$, будем иметь

$$P_n = \text{sign} \left[(u_{cn} i_{cn} + u_{sn} i_{sn}) \cos\phi_{мч} + (u_{sn} i_{cn} - u_{cn} i_{sn}) \sin\phi_{мч} \right] \cdot 1. \quad (5)$$

При известном $\phi_{мч}$ значения $\cos\phi_{мч}$ и $\sin\phi_{мч}$ могут быть заданы как постоянные коэффициенты.

В конечном итоге результат функционирования ОНМ сводится к следующему:

- при $P_n = 1$ – направление мощности прямое;
- при $P_n = -1$ – обратное.

Если выражение, заключенное в квадратные скобки, в формуле (5) приобретает нулевое значение, то это свидетельствует об отсутствии одного или двух сигналов, что может быть использовано в системе контроля исправности входных цепей.

Необходимо иметь в виду, что при близких к месту установки защиты КЗ подводимое к ОНМ напряжение может быть очень малым (теоретически нулевым). Это обуславливает «мертвую» зону, достоверное определение направления мощности в которой невозможно. В цифровых ОНМ пороговое линейное напряжение указанной зоны устанавливается на уровне 1 В [6]. Следует отметить, что это значение напряжения гарантирует вполне достаточную помехоустойчивость органа.

Для устранения «мертвой» зоны может быть организована работа ОНМ по «памяти». Наиболее эффективным представляется обеспечение функционирования ОНМ в «мертвой» зоне с использованием «памяти» напряжения, поскольку обеспечивается практически непрерывное определение направления мощности.

Однако следует отметить, что длительное сохранение опорного напряжения требует частотной компенсации, так как любое отклонение частоты системы от номинальной повлечет за собой угловое изменение характеристики направленности и приведет к неустойчивой работе ОНМ.

Для быстросрабатывающих ступеней токовых направленных защит требуется ОНМ с памятью в течение примерно 100 мс, а для резервных ступеней – до 2 с.

В алгоритме функционирования ОНМ на основе изложенных выше теоретических предпосылок в качестве исходной информации выступают выборки подводимых напряжения u_n и тока i_n ($n = 1, 2, \dots, N$). При этом из входных сигналов u_n, i_n с помощью нерекурсивных цифровых фильтров (ЦФ) Фурье или их модификаций [7, 8] выделяются косинусные u_{cn}, i_{cn} и синусные u_{sn}, i_{sn} ОС основных гармоник, которые непосредственно используются в процессе выполнения операций алгоритма ОНМ.

Для реализации частотной компенсации при работе ОНМ по «памяти» по трем смежным выборкам синусной либо косинусной ОС тока $i_{on}, i_{o(n-1)}, i_{o(n-2)}$ вычисляется косинус фазового угла выборок по выражению [9]

$$\cos(\omega\Delta t)_n = \frac{i_{on} + i_{o(n-2)}}{2i_{o(n-1)}}. \quad (6)$$

Если на данном шаге $i_{o(n-1)}$ близко к нулю,

что проверяется выполнением условия $\frac{|i_{o(n-1)}|}{I_{mn}} < i_{*min}$, где I_{mn} – амплитуда тока; i_{*min} – относительное минимальное значение выборки тока, то $\cos(\omega\Delta t)_n$ не вычисляется, а ему присваивается значение с предыдущего шага $\cos(\omega\Delta t)_n = \cos(\omega\Delta t)_{(n-1)}$, в противном случае проверяется, не выходит ли величина косинуса за пределы диапазона, граничные значения которого определяются выбранными частотами. При необходимости косинус фазового угла выборок устанавливается на уровне ближайшего граничного значения. Затем вычисляется синус фазового угла выборок с учетом, что $\omega\Delta t < \frac{\pi}{2}$:

$$\sin(\omega\Delta t)_n = \sqrt{1 - \cos^2(\omega\Delta t)_n}. \quad (7)$$

Если амплитуда подводимого напряжения $U_{mn} = \sqrt{u_{sn}^2 + u_{cn}^2}$ превышает пороговое напряжение $U_{mmin} = 1,4$ В [6], то это свидетельствует

о том, что ОНМ не находится в «мертвой» зоне и функционирует в обычном режиме с определением признака P по (5) с использованием ОС $u_{cn}, u_{sn}, i_{cn}, i_{sn}$.

При $U_{mn} \leq U_{mmin}$ ОНМ переводится в режим работы по «памяти». Так как используется «память» напряжения, выборки ОС напряжения в этом режиме u_{sxn}, u_{cxn} вычисляются в соответствии с приведенными в [9] выражениями по их значениям с предыдущего шага $u_{sx(n-1)}, u_{cx(n-1)}$:

$$u_{sxn} = u_{sx(n-1)} \cos(\omega\Delta t)_n + u_{cx(n-1)} \sin(\omega\Delta t)_n; \quad (8)$$

$$u_{cxn} = u_{cx(n-1)} \cos(\omega\Delta t)_n - u_{sx(n-1)} \sin(\omega\Delta t)_n.$$

В этом случае признак P определяется по (5) с использованием ОС напряжения u_{sxn}, u_{cxn} и тока i_{cn}, i_{sn} .

Оценка качества функционирования и эффективности ОНМ на основе изложенных принципов действия выполнена с использованием метода вычислительного эксперимента.

Моделирование

В системе динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [10] реализована структура модели для испытаний рассмотренного выше цифрового ОНМ, которая позволяет исследовать процессы в электроэнергетической системе с двусторонним питанием. Она включает в себя: модели двух энергосистем с возможностью задания у них произвольных значений частот, двух линий электропередачи с нагрузками, модели трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН), блоки задания вида КЗ, а также модель испытуемого ОНМ. За исключением последней модели, реализация всех указанных блоков подробно рассмотрена в [11].

Цифровой ОНМ моделируется согласно приведенным выше выражениям в виде отдельной подсистемы, в которой, согласно [12], формируются эквивалентные ОС фазного тока и линейного напряжения, а также вычисляется в относительных единицах признак P . Кроме того, в модели реализована возможность работы ОНМ по «памяти», необходимость в кото-

рой возникает в том случае, когда уровень подводимого к ОНМ амплитудного значения вторичного напряжения U_{mn} становится ниже предварительно заданного минимального уровня $U_{m\min}$, принятого для наглядности в настоящей работе равным 5 В.

Еще одним параметром, который сложно контролировать в реальном устройстве, является угол $\Delta\varphi = \Psi + \varphi_{\text{мч}}$ между векторами напряжения и тока, подводимых к ОНМ. В модели для этой цели используются стандартные библиотечные блоки *Discrete Fourier*, позволяющие определять значение разности фаз $\Delta\varphi$, которое в переходных режимах можно сглаживать усредняющим частотным фильтром.

Результаты исследования

Функционирование модели цифрового ОНМ проверялось в различных режимах работы электроэнергетической системы. Для этих целей использовались токи и напряжения, приближенные к реальным вторичным сигналам соответствующих измерительных трансформаторов, и только для определения зоны действия ОНМ применялись синусоидальные тестовые воздействия.

1. Определение зоны действия ОНМ

В работе исследовался цифровой ОНМ с углом максимальной чувствительности $\varphi_{\text{мч}} = 45^\circ$, расчетная зона действия которого лежит в диапазоне от -45° до 135° .

Входные сигналы ОНМ – синусоидальные ток 1 и напряжение 2 с частотой 50 Гц. В нормальном режиме уровни тока и напряжения составляют соответственно 0,1 и 1 о. е. При КЗ,

которое длится от 0,1 с до 0,2 с, величина тока увеличивается до 1 о. е., а значение напряжения уменьшается до 0,2 о. е.

При угле 135° наблюдается неустойчивая работа ОНМ (рис. 2). Признак P , для наглядности умноженный на 100 (кривая 3), многократно меняет знак, хотя усредненное значение разности фаз $\Delta\varphi$ (кривая 1) находится в зоне срабатывания. При уменьшении угла на 1° (до 134°) действие ОНМ становится стабильным. Аналогичные процессы происходят и с противоположной стороны зоны действия ОНМ.

Таким образом, реальная зона стабильной работы ОНМ в прямом направлении лежит в пределах от -44° до 134° , то есть составляет 178° , причем снижение частоты сети не изменяет зону действия ОНМ.

2. Реакция ОНМ на трехфазное КЗ в прямом и обратном направлениях

Входные сигналы тока (кривая 1) и напряжения (кривая 2) частотой 50 Гц приближены к реальным воздействиям в нагрузочных режимах и при трехфазных КЗ (рис. 3а). В моменты времени 0–0,2 с; 0,4–0,6 с; 0,8–1,0 с моделируются режимы нагрузки, в моменты времени 0,2–0,4 с – трехфазное удаленное КЗ в обратном направлении, а в моменты 0,6–0,8 с – воспроизводится трехфазное удаленное КЗ в прямом направлении.

На рис. 3б приведены временные характеристики ОНМ. Как видно из рисунка, срабатывание ОНМ происходит только при КЗ в прямом направлении (кривая 3) и не происходит при КЗ за «спиной» ОНМ.

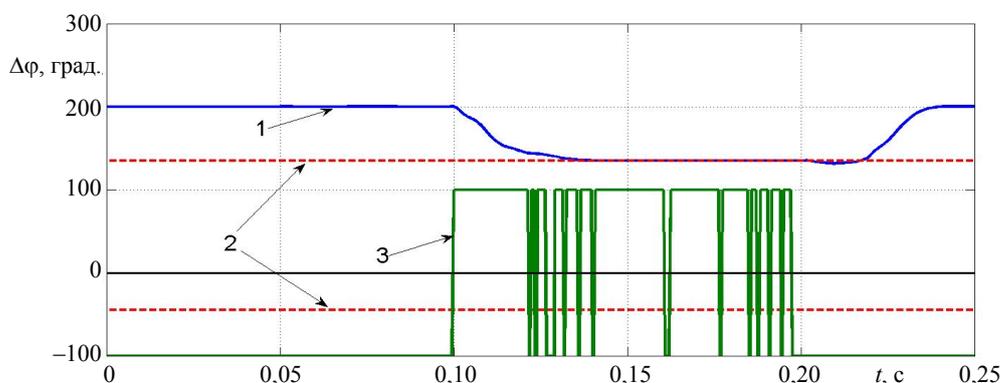


Рис. 2. Поведение органов направления мощности на границе срабатывания: 1 – разность фаз $\Delta\varphi$; 2 – диапазон углов от -45° до 135° , при которых ОНМ срабатывает; 3 – признак P

Fig. 2. Behavior of power direction control at pickup limit: 1 – phase difference $\Delta\varphi$; 2 – angle range from -45° to 135° , at which power direction control operates; 3 – sign P

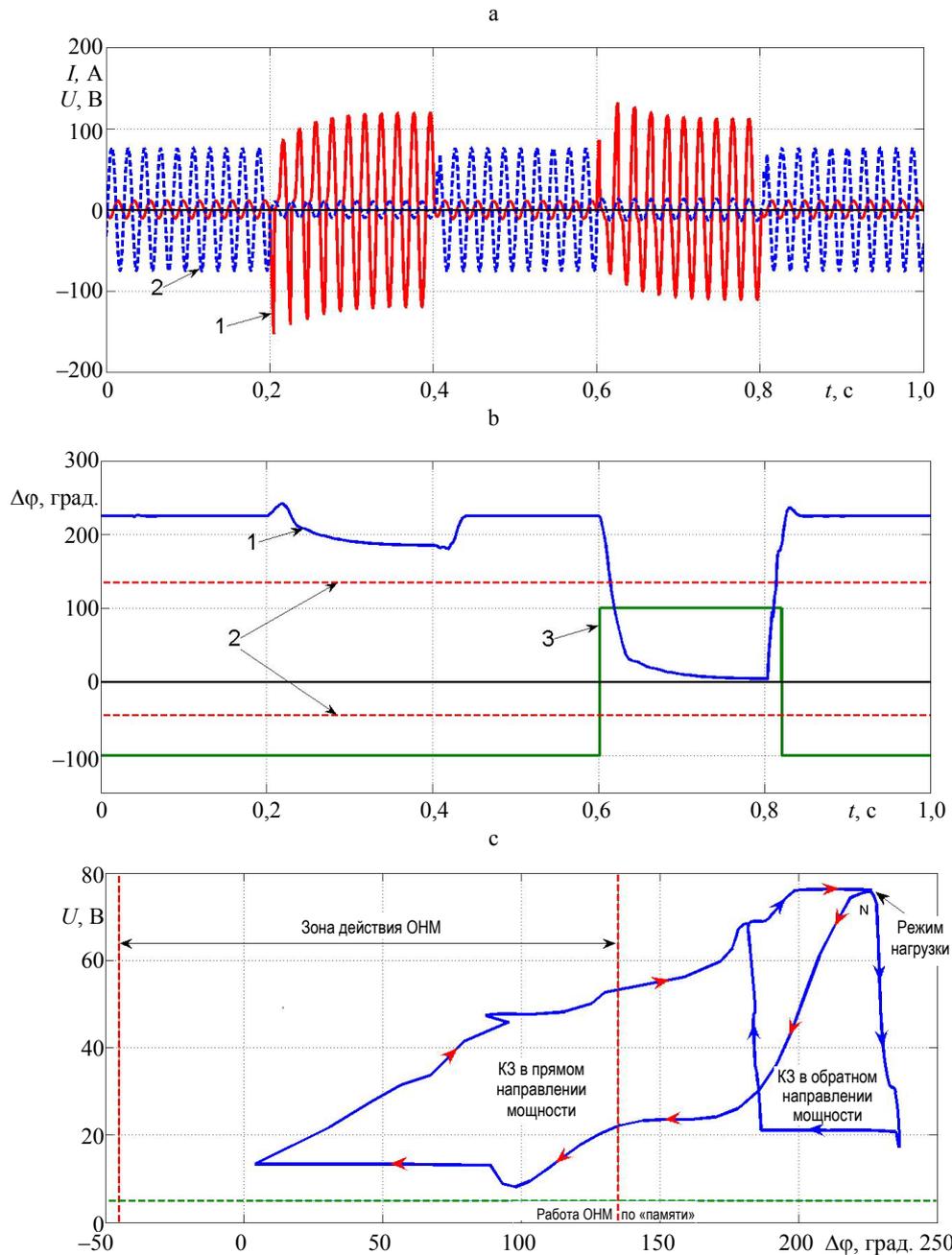


Рис. 3. а – удаленные трехфазные КЗ в обратном и прямом направлениях: 1 – ток; 2 – напряжение; б – временные характеристики органов направления мощности: 1 – разность фаз $\Delta\phi$; 2 – диапазон углов от -45° до 135° , при которых ОНМ срабатывает; 3 – признак P ; в – траектория рабочей точки

Fig. 3. a – remote three-phase short circuits in reverse and forward directions: 1 – current; 2 – voltage; б – time characteristics of power direction controls: 1 – phase difference $\Delta\phi$; 2 – angle range from -45 to 135 , at which power direction control operates; 3 – sign P ; в – operating point trajectory

На рис. 3в представлена траектория движения рабочей точки, воспроизводящей зависимость амплитуды вторичного напряжения U_{\max} от разности фаз между током и напряжением $U_{\max} = f(\Delta\phi)$. Траектория рабочей точки зависит от режима энергосистемы. В нагрузочном режиме U_{\max} и $\Delta\phi$ не изменяются и поэтому рабочая точка

остается неподвижной (точка N). При КЗ в обратном направлении мощности движение рабочей точки происходит по замкнутому контуру, который не попадает в зону действия ОНМ. В случае прямого направления мощности ($t = 0,6-0,8$ с на рис. 3а) траектория движения рабочей точки имеет форму петли, которая входит в зону дей-

ствия ОНМ (пунктирные линии, соответствующие диапазону углов от -45° до 135°) в начальный момент КЗ и выходит из нее при его исчезновении. Направление перемещения рабочей точки при обоих видах КЗ обозначено стрелками.

3. Удаленное КЗ в прямом направлении при различных частотах сети

Входные сигналы тока 1 и напряжения 2 приведены на рис. 4а. Трехфазное КЗ происходит в моменты времени от 0,1 до 0,3 с, при этом сравнивается поведение ОНМ при частотах 50 и 48 Гц.

На рис. 4б, по аналогии с рис. 3с, представлены траектории перемещения рабочей точки при частоте 50 Гц (кривая 1) и 48 Гц (кривая 2). Начало и окончание перемещения – правый верхний угол рисунка, где располагается нагрузочный режим. Обе петли входят в зону срабатывания, что свидетельствует о частотонезависимости функционирования ОНМ.

4. Близкое КЗ в прямом направлении при различных частотах сети

Трехфазное КЗ на шинах, где установлен ОНМ, происходит в момент времени $t = 0,1$ с (рис. 5а). Напряжение, подводимое к ОНМ, становится меньше U_{\min} , которое для наглядности принято $U_{\min} = 5$ В. Запоминаются параметры предаварийного режима при частоте 50 Гц и вырабатывается признак работы по «памяти» (кривая 4). При этом признак P (кривая 3) больше нуля и держится на этом уровне все время существования КЗ.

На рис. 5б представлены траектории перемещения рабочей точки при работе ОНМ по «памяти» на частотах 50 Гц (кривая 1) и 48 Гц (кривая 2). Предполагается, что аварийный и предаварийный режимы происходят при одинаковых частотах. Признак P для этих режимов находится в зоне действия ОНМ на протяжении всего времени существования КЗ. При этом траектории рабочих точек в обоих случаях попадают в зону работы ОНМ по «памяти».

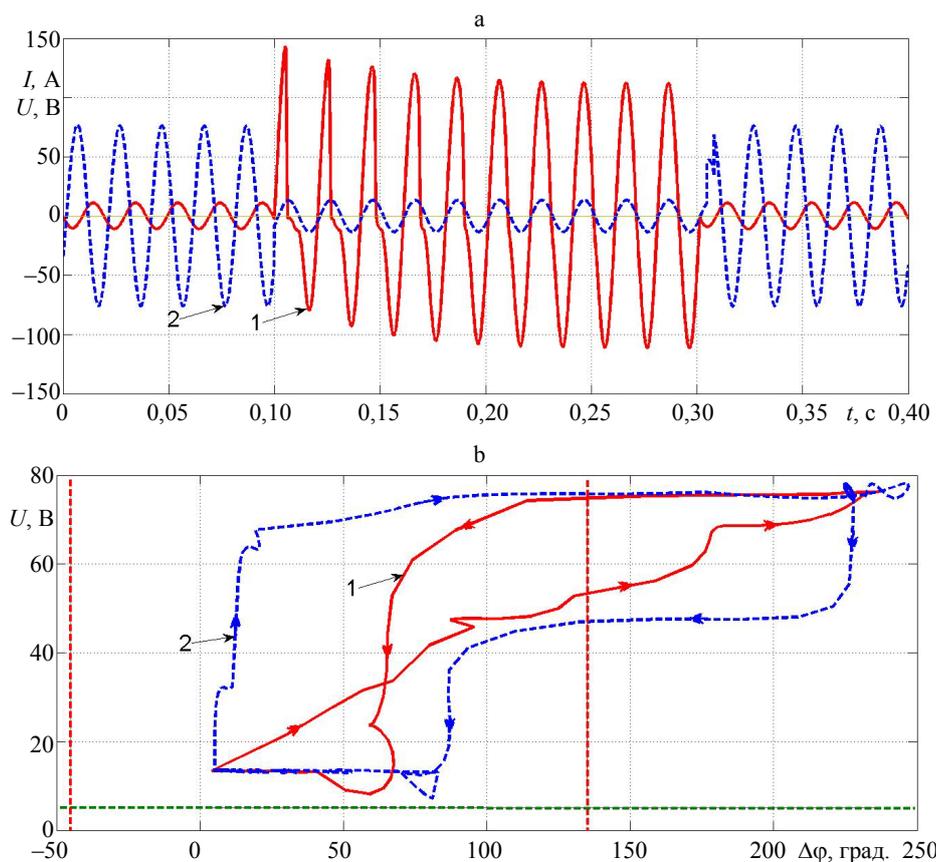


Рис. 4. а – входные сигналы, приближенные к реальным воздействиям: 1 – тока, 2 – напряжения; б – траектории рабочих точек: 1 – при 50 Гц; 2 – при 48 Гц

Fig. 4. а – input signals close to real impacts: 1 – current; 2 – voltage; б – operating point trajectory: 1 – at 50 Hz; 2 – at 48 Hz

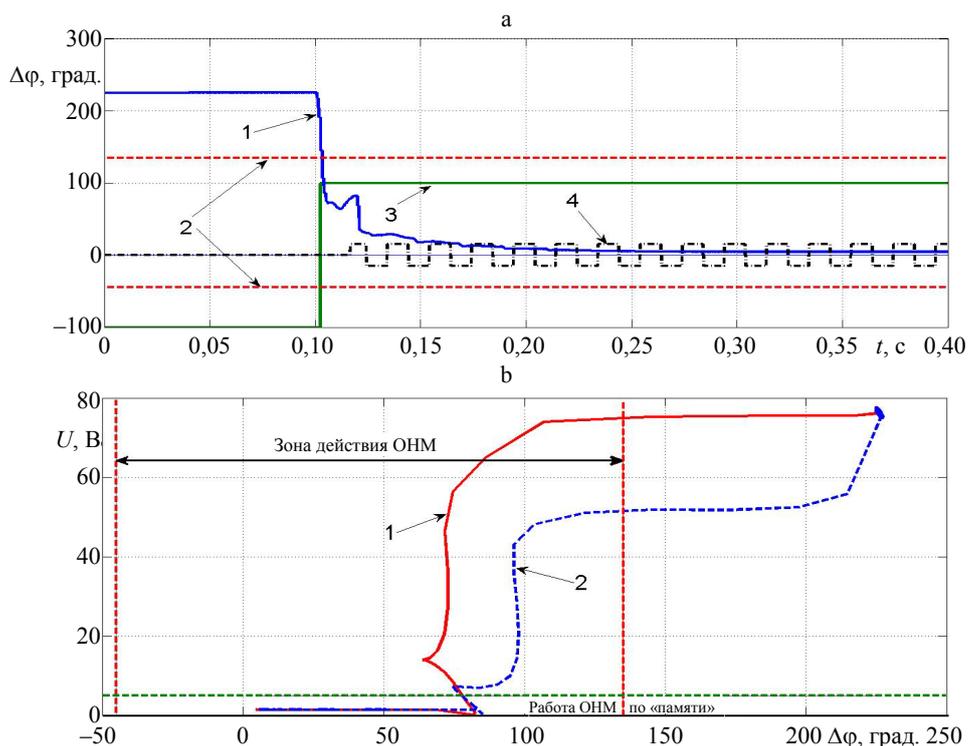


Рис. 5. а – работа по «памяти» ОНМ при близком трехфазном КЗ; б – сравнение действия ОНМ при близких КЗ и различных частотах: 1 – 50 Гц; 2 – 48 Гц

Fig. 5. а – “memory” operation of the power direction control in the event of a close three-phase short circuit; б – comparison of the action of the power directional control at close short circuits and different frequencies: 1 – 50 Hz; 2 – 48 Hz

Более реалистичный случай работы по «памяти» представлен на рис. 6. По-прежнему моделируется близкое КЗ в прямом направлении, возникающее в момент времени 0,2 с (кривая 1), однако частоты сети в аварийном и предаварийном режимах – разные. При КЗ, когда происходит работа по «памяти», частота снижается до 48 Гц. В этом случае использование отсчетов напряжений U_{mn} для вычислений косинуса и синуса фазового угла выборок на всем протяжении работы по «памяти» будет приводить к накоплению

ошибки, связанной с различием запомненных при частоте 50 Гц параметров и их текущими значениями при пониженной частоте. При этом, в отличие от выборок напряжений, выборки токов за все время КЗ остаются на приемлемом уровне для получения достоверных значений указанных величин, определяемых по формулам (6) и (7). Как видно из рис. 6, использование выборок тока позволяет ОНМ оставаться работоспособным все время существования КЗ, независимо от его длительности (кривая 2).

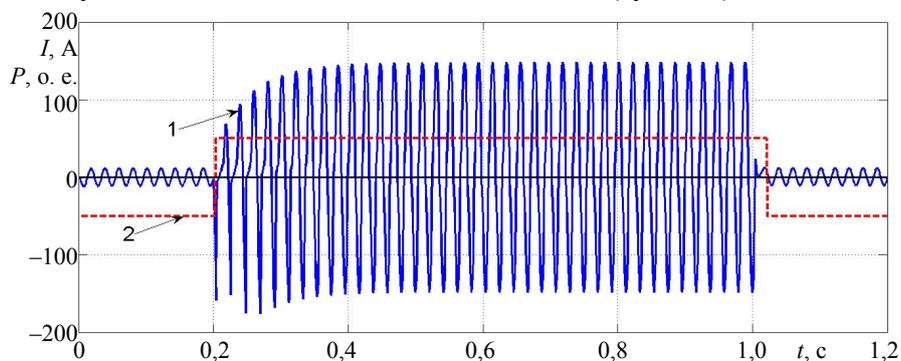


Рис. 6. Работа ОНМ по «памяти» при близком трехфазном КЗ: 1 – вторичный ток ТТ частотой 50 Гц в нормальном режиме и 48 Гц при КЗ; 2 – признак P

Fig. 6. “Memory” operation of the power direction control in the event of a close three-phase short circuit: 1 – secondary current of the current transformer with a frequency of 50 Hz in normal mode and 48 Hz in the event of a short circuit; 2 – sign P

ВЫВОД

Совместное использование существующих и предложенных принципов выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах линий обеспечивает повышение его технического совершенства и позволяет устранить «мертвую» зону с сохранением устойчивого функционирования в течение сколь угодно длительного промежутка времени благодаря реализации частотной компенсации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей / Я. С. Гельфанд. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
2. Фадке Арун, Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / Арун Г. Фадке, Джеймс С. Торп; пер. с англ. под ред. Г. С. Нудельмана. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
3. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
4. Гурьянчик, О. А. Организация функционирования органа направления мощности в микропроцессорных токовых направленных защитах / О. А. Гурьянчик // Наука и техника. 2013. № 3. С. 56–58.
5. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок: учеб. пособие / Ф. А. Романюк. Минск: УП «Технопринт», 2001. 133 с.
6. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Г. Циглер; пер. с англ. под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Энергоиздат. 2005. 322 с.
7. 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>.
8. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
9. Романюк, Ф. А. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>.
10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
11. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
12. Романюк, Ф. А. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев, // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.

№ 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.

Поступила 18.04.2023

Подписана к печати 20.06.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Gelfand Ya. S. (1987) *Relay Protection of Distribution Networks*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 368 (in Russian).
2. Phadke A. G., Thorp J. S. (2009) *Computer Relaying for Power Systems*. John Wiley & Sons. 344. <https://doi.org/10.1002/9780470749722>.
3. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems. Relay Protection of Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
4. Gurianchik O. A. (2013) Organization of Power Directional Element Operation in Micro-Processor Current Directional Protections. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 56–58 (in Russian).
5. Romaniuk F. A. (2001) *Information Support for Microprocessor Protection of Electrical Installations*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 133 (in Russian).
6. Ziegler G. (2006) *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. 2nd ed. Publicis Corporate Pub., Publicis. 378.
7. 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).
8. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S. (2019) Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14> (in Russian).
10. Chernykh I. V. (2011) *Modeling Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems u Simulink*. Moscow, DMK Press Publ.; Saint Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
11. 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).
12. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. A., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412> (in Russian).

Received: 18.04.2023

Accepted: 20.06.2023

Published online: 31.07.2023

Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора PWR с ТВС-Квадрат разных конструкций

Докт. техн. наук, проф. С. М. Дмитриев¹), инж. А. Л. Буров²), асп. Т. Д. Демкина¹), инж. А. А. Добров¹), канд. техн. наук Д. В. Доронков¹), асп. Д. С. Доронкова¹), магистр Д. Д. Курицин¹), инж. А. Н. Пронин¹), асп. А. В. Рязанов¹), канд. техн. наук Д. Н. Солнцев¹)

¹)Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Российская Федерация),

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

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

Реферат. В статье приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя в активной зоне реактора PWR с ТВС-Квадрат разных конструкций. Экспериментальные исследования гидродинамики заключались в изучении полей скоростей и процесса поперечного перетекания теплоносителя между соседними ТВС-Квадрат разных конструкций в однородной и смешанной активных зонах на масштабных экспериментальных моделях, включающих в себя фрагменты двух соседних ТВС-Квадрат и зазор между ними. Экспериментальные модели отличаются количеством установленных решеток. Это обусловлено тем, что в однородной активной зоне гидравлическая нагрузка по высоте ТВС идентична, а в смешанной – неравномерна из-за разного количества установленных решеток. Гидродинамика теплоносителя изучалась на аэродинамическом исследовательском стенде с учетом теории гидродинамического подобия с использованием пневмометрических датчиков с индивидуальной тарировкой. На основании полученных данных построены поля локальных осевых и поперечных скоростей в различных сечениях по длине исследуемого участка экспериментальных моделей. Изучены поля локальных безразмерных поперечных и аксиальных скоростей потока в твэльных пучках и зазоре между ТВС-Квадрат активной зоны реактора PWR. Выявлены особенности процесса поперечного перетекания потока между соседними ТВС-Квадрат однородной и смешанной активной зон реактора PWR. Результаты экспериментальных исследований переданы разработчику ТВС-Квадрат АО «ОКБМ Африкантов» для дальнейшего использования при обосновании конструкции и режимов работы ядерной энергетической установки.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, ТВС-Квадрат, перемешивающая и дистанционирующая решетка, стабилизирующая решетка, гидродинамика теплоносителя, поперечное перетекание потока

Для цитирования: Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора PWR с ТВС-Квадрат разных конструкций / С. М. Дмитриев [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 326–332. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-326-332>

Coolant Hydrodynamics in the PWR Reactor Core with TVS-Kvadrat of Various Designs

S. M. Dmitriev¹), A. L. Burov²), T. D. Demkina¹), A. A. Dobrov¹), D. V. Doronkov¹), D. S. Doronkova¹), D. D. Kuritsin¹), A. N. Pronin¹), A. V. Ryazanov¹), D. N. Solntsev¹)

¹)Nizhniy Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev (Nizhniy Novgorod, Russian Federation),

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

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the hydrodynamics of the coolant in the core of the PWR reactor with fuel assemblies “TVS-Kvadrat” of various designs. Experimental studies of hydrodynamics consisted in studying

Адрес для переписки

Дмитриев Сергей Михайлович
Нижегородский государственный технический университет
имени Р. Е. Алексеева
ул. Минина, 24,
603950, г. Нижний Новгород,
Российская Федерация
Тел.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.ru

Address for correspondence

Dmitriev Sergei M.
Nizhny Novgorod State Technical University
named after R. E. Alekseev
24, Minina str.,
603950, Nizhny Novgorod,
Russian Federation
Tel.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.ru

the velocity fields and the process of cross-flow of coolant between adjacent fuel assemblies “TVS-Kvadrat” of various designs in homogeneous and mixed cores on large-scale experimental models, including fragments of two adjacent fuel assemblies “TVS-Kvadrat” and a gap between them. The test models differ in the number of installed grids, this is due to the fact that in a homogeneous core the hydraulic load along the height of the fuel assemblies is identical, and in a mixed core the hydraulic load is uneven due to the different number of installed grids. The hydrodynamics of the coolant has been studied on an aerodynamic open-loop based on the theory of hydrodynamic similarity, using individually calibrated pneumometric sensors. Based on the data obtained, the fields of local axial and transverse velocities in various sections along the length of the studied section of the test models have been constructed. The fields of local dimensionless transverse and axial flow velocities in the fuel bundles and the gap between the fuel assemblies “TVS-Kvadrat” of the PWR reactor core have been studied. Peculiarities of the process of transverse flow between adjacent “TVS-Kvadrat” of a homogeneous and the mixed core of the PWR reactor have been revealed. The results of experimental studies have been transferred to the developer of “TVS-Kvadrat”, that is JSC “Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering named after I. I. Afrikantov”, for further use in justifying the design and operating modes of a nuclear power plant.

Keywords: nuclear reactor, core, TVS-Kvadrat, mixing and spacer grid, stabilizing spacer grid, coolant hydrodynamics, coolant cross flow

For citation: Dmitriev S. M., Burov A. L., Demkina T. D., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Doronkova D. S., Kuritsin D. D., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N. (2023) Coolant Hydrodynamics in the PWR Reactor Core with TVS-Kvadrat of Various Designs. *Science and Technique*. 22 (4), 326–332. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-326-332> (in Russian)

Введение

Для реакторов PWR в АО «ОКБМ Африкантов» разработана бесчехловая ТВС-Квадрат [1, 2], в конструкцию которой помимо дистанционирующих решеток (ДР) включены перемешивающие дистанционирующие решетки (ПДР) и стабилизирующие решетки (СР). Применение данных решеток позволяет интенсифицировать процессы перемешивания теплоносителя в активной зоне и обеспечить необходимую жесткость конструкции. На ПДР установлены турбулизирующие лопатки в регулярных ячейках и в области направляющего канала (НК). В области направляющего канала из-за меньшего проходного сечения площадь лопаток на 14,6 % меньше площади лопаток в регулярных ячейках. Угол наклона всех лопаток на ПДР постоянный. Стабилизирующая решетка состоит из взаимно перпендикулярных пластин, расстояние между которыми соответствует шагу между ТВЭлами.

При эксплуатации реакторов PWR возможны ситуации, когда в активной зоне реактора одновременно будут установлены ТВС-Квадрат без стабилизирующих решеток и со стабилизирующими решетками. В данном случае по высоте активной зоны будет неравномерная гидравлическая нагрузка, что в условиях применения бесчехловых ТВС-Квадрат приведет к перераспределению расходов между соседними ТВС и возникновению поперечных течений

теплоносителя в периферийных рядах ТВЭлов и зазоре между сборками. Таким образом, в смешанной активной зоне формирование полей поперечных скоростей будет происходить под влиянием двух факторов – турбулизирующих лопаток ПДР и неравномерной гидравлической нагрузки по высоте смешанной активной зоны. Особенности течения теплоносителя в смешанной активной зоне необходимо учитывать при обосновании различных режимов эксплуатации и оценки запасов до кризиса теплоотдачи [3–7].

Описание экспериментальной модели и методики исследований

Исследование процесса поперечного перетекания теплоносителя в активной зоне реактора PWR заключалось в изучении распределения безразмерных локальных поперечных $W_{XY}/W_{СР.Р}$ и аксиальных $W_Z/W_{СР.Р}$ скоростей (W_{XY} и W_Z – значения поперечных и аксиальных скоростей в точке измерения соответственно; $W_{СР.Р}$ – среднерасходная скорость рабочей среды через ЭМ) в области зазора и периферийных рядах ТВЭлов ТВС-Квадрат. Безразмерная скорость определялась отношением скорости рабочей среды в точке измерения к среднерасходной скорости в модели. Экспериментальные исследования проводились на аэродинамическом стенде на основе теории гидродинамического подобия, согласно которой профиль безразмерной ско-

рости в области автомодельного течения остается постоянным [8]. Оборудование стенда позволяет проводить исследования при числах Рейнольдса $Re \sim 100000$ в области автомодельного течения. В работах [9–11] ранее было показано, что на моделях фрагментов ТВС-Квадрат область автомодельного течения начинается при числах Рейнольдса 55000–70000.

Для исследования распределения поперечных и аксиальных скоростей были созданы масштабные экспериментальные модели области активной зоны реактора PWR, включающей в себя фрагменты двух соседних ТВС-Квадрат и зазор между ними. Твэльный пучок каждой ТВС состоит из 35 имитаторов твэлов и одного имитатора направляющего канала. Первая экспериментальная модель представляет собой гладкий твэльный пучок, расположенный между ДР (рис. 1а), вторая – фрагмент однородной активной зоны с симметрично расположенными ПДР и СР (рис. 1б), третья – фрагмент смешанной активной зоны с несимметрично расположенными решетками, а именно, в одной из ТВС отсутствует СР (рис. 1с).

Область измерения включает регулярные, периферийные ячейки и ячейки области направляющего канала. Поперечное сечение экспериментальных моделей и область исследований показаны на рис. 2. В пределах каждой ячейки аксиальная и поперечная скорости из-

мерялись в 80–100 точках, что позволило построить подробную картину течения.

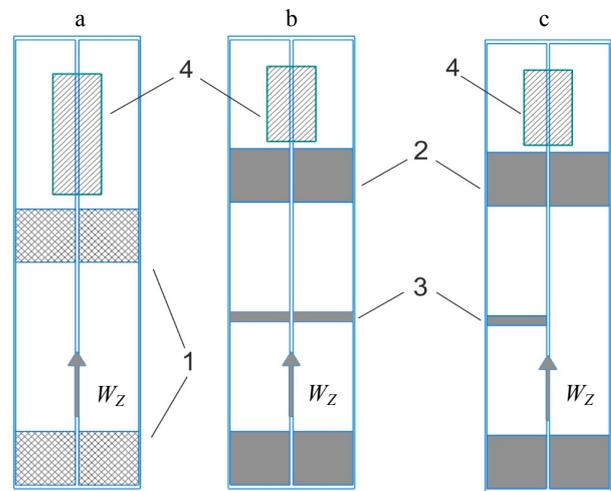


Рис. 1. Экспериментальные модели:
1 – дистанционирующие решетки, 2 – перемешивающие дистанционирующие решетки, 3 – стабилизирующие решетки, 4 – область исследований

Fig. 1. Test models:
1 – spacer grids, 2 – mixing spacer grids, 3 – stabilizing grids, 4 – research area

Для измерения скорости потока использовался пятиканальный пневмометрический зонд с индивидуальной тарировочной характеристикой [12]. Измерительный зонд устанавливался в автоматизированное координатное устройство, позволяющее позиционировать средство измерения с точностью 0,05 мм.

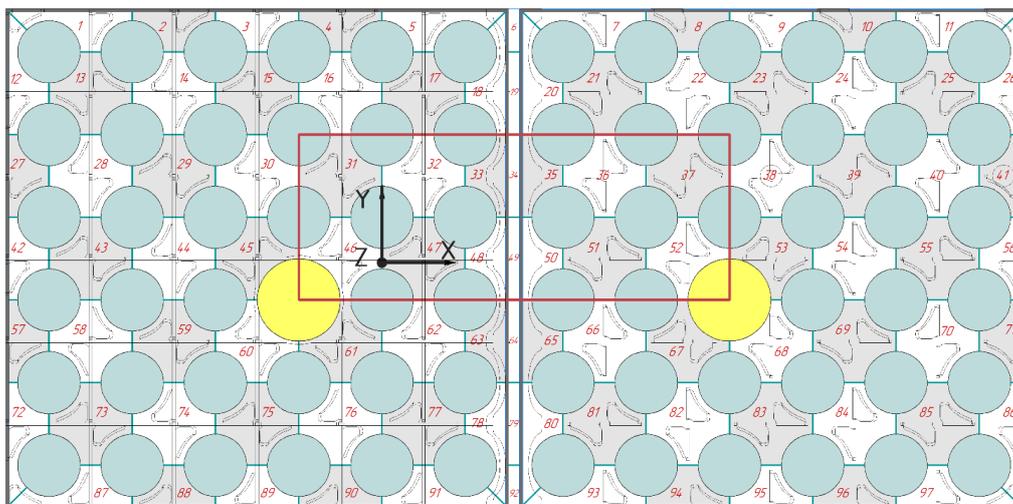


Рис. 2. Поперечное сечение экспериментальных моделей и область исследований

Fig. 2. Cross section of test models and research area

Результаты исследований

На первом этапе исследований была изучена картина течения в гладком твэльном пучке ТВС-Квадрат, расположенном между двумя соседними ДР (рис. 1а). Наиболее интенсивные поперечные течения возникают в межтвэльных зазорах, величина безразмерной поперечной скорости в них лежит в диапазоне 0,05–0,08. Поперечные течения через выделенные зазоры преимущественно обусловлены перераспределением аксиального потока из зазора между ТВС в твэльный пучок. В регулярных ячейках и ячейках области НК величина поперечной скорости потока мала и составляет 0,01–0,03 (рис. 3). В периферийных ячейках и зазоре между ТВС величина поперечной скорости потока составила 0,04–0,05.

Максимумы безразмерной аксиальной скорости наблюдаются в центрах регулярных ячеек и составляют 1,2. Наименьшие значения безразмерной аксиальной скорости по длине экспериментального участка наблюдались в межтвэльных зазорах и составляют 0,80–0,85. При удалении от ДР происходит выравнивание аксиальных скоростей по сечению твэльного пучка, которое обусловлено поперечным перетеканием теплоносителя между ячейками, отличающимися площадью проходного сечения. При изменении относительной координаты L/d_r (L – расстояние от решетки до сечения

измерения; d_r – гидравлический диаметр) от 3,1 до 12,5 в регулярных ячейках происходит снижение аксиальной скорости в центре на 10–15 % (рис. 4).

Таким образом, гидродинамическая картина движения потока в гладком пучке твэлов преимущественно обусловлена процессом перераспределения части потока из зазора между ТВС-Квадрат в сами сборки, а также геометрическими особенностями твэльного пучка.

На следующем этапе исследований изучалась гидродинамика в однородной активной зоне с симметрично расположенными ПДР и СР (рис. 1б).

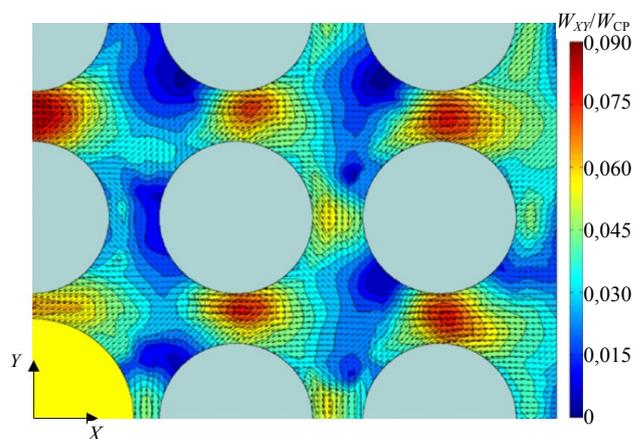


Рис. 3. Поперечная скорость потока в гладком твэльном пучке

Fig. 3. Transverse flow velocity in a fuel bundle

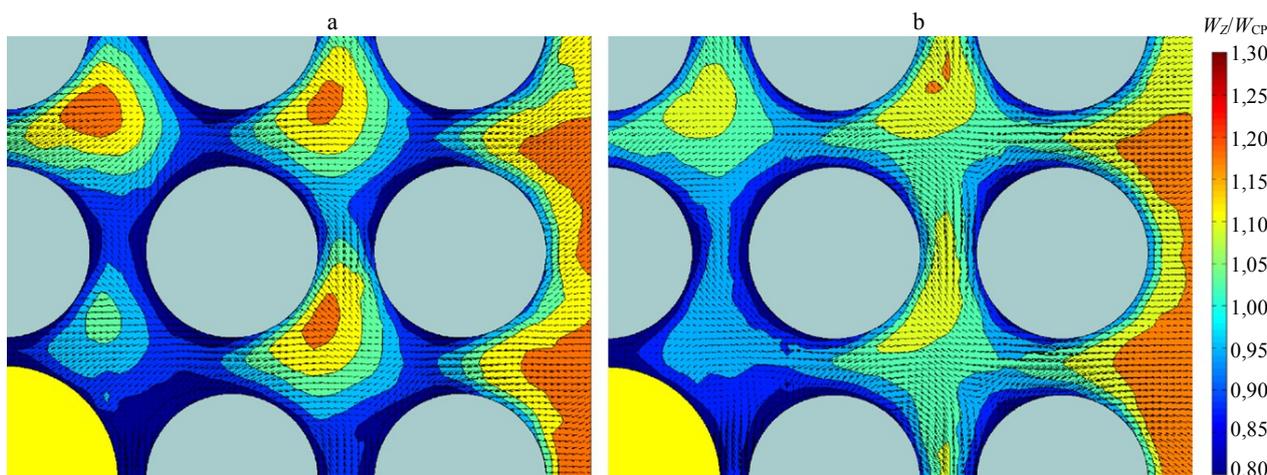


Рис. 4. Аксиальная скорость потока в активной зоне с ТВС-Квадрат: а – при относительной координате $L/d_r = 3,5$; б – 12,5

Fig. 4. Axial flow velocity in the core with fuel assembly “TVS-Kvadrat”: а – at relative coordinate $L/d_r = 3,5$; б – 12,5

Формирование поперечных течений происходит под действием смесительных лопаток ПДР. В твэльном пучке величина безразмерной поперечной скорости изменяется от 0,25 до 0,60, а в области зазора лежит в диапазоне 0,1–0,3 (рис. 5). Максимумы поперечной скорости в твэльном пучке локализованы непосредственно за ПДР в областях регулярных ячеек, занятых дефлекторами. По мере удаления от ПДР поперечные скорости убывают. При изменении относительной координаты L/d_r от 1,8 до 3,3 безразмерная поперечная скорость снижается с 0,6 до 0,45. При удалении от ПДР происходит смещение максимумов безразмерной поперечной скорости из центров ячеек в направлении зазоров между твэлами. На расстоянии $L/d_r \sim 5,1$ в твэльном пучке и зазоре между ТВС-Квадрат по направлению ориентации лопаток формируются устойчивые макротечения, которые интенсифицируют процесс перемешивания потока между соседними ТВС. Величина относительных поперечных скоростей в макротечениях на участке L/d_r от 5,1 до 12,7 снижается с 0,3–0,5 до 0,15–0,35.

Поперечные потоки между соседними ТВС формируются согласно схеме расположения лопаток. Поперечное перетекание потока происходит не фронтально через соседние зазоры между твэлами, а в шахматном порядке, последовательно через один зазор (рис. 5). Величина безразмерной поперечной скорости потока в макротечениях между соседними ТВС-Квадрат лежит в диапазоне 0,15–0,30.

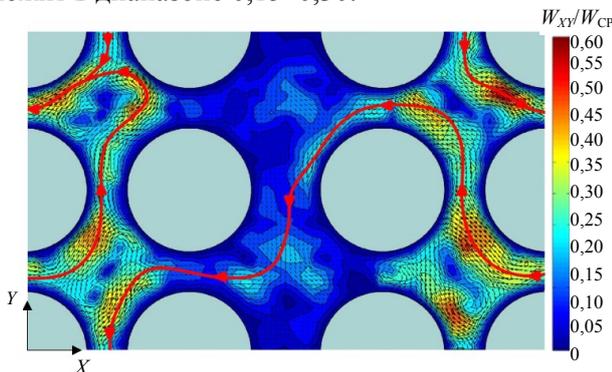


Рис. 5. Поперечные потоки и вихревые структуры в однородной активной зоне на расстоянии $L/d_r = 1,8$ от ПДР

Fig. 5. Cross flows and vortex structures in a homogeneous core at a distance $L/d_r = 1.8$ from the mixing and spacer grid

В регулярных ячейках за лопатками образуется пара диагонально расположенных вихрей. На расстоянии $L/d_r = 3,3$ от ПДР происходит слияние двух малых вихрей в один большой, расположенный в центре. Образовавшийся вихрь взаимодействует с поперечными макротечениями, изменяя их структуру, и постепенно рассеивается, при этом перемещаясь в поперечном сечении ячеек. Рассеяние вихрей наблюдается на расстоянии $L/d_r = 7,6$ от ПДР.

В смешанной активной зоне (рис. 1с) из-за различного количества решеток в соседних ТВС-Квадрат возникает неравномерное поле аксиальной скорости потока. Локальные максимумы лежат в областях поперечного сечения ячеек, занятых дефлекторами.

По мере удаления от ПДР наблюдается смещение локальных пиков в направлении зазоров между твэлами и постепенное выравнивание поля аксиальной скорости по сечению ячеек. Локальные минимумы аксиальной скорости расположены в области зазора между ТВС и у поверхности твэлов. Величина безразмерной аксиальной скорости в локальных минимумах лежит в диапазоне 0,55–0,75. В твэльном пучке с СР безразмерные аксиальные скорости на расстоянии $L/d_r \sim 1,86$ от решетки лежат в диапазоне 0,8–1,1, а в ТВС без СР в диапазоне 0,90–1,25 (рис. 6). На расстоянии $L/d_r \sim 10,2$ профиль безразмерной аксиальной скорости выравнивается. Наиболее интенсивно процесс выравнивания аксиальной скорости по сечению твэльного пучка протекает в областях, соответствующих траекториям образовавшихся поперечных макротечений.

За пластинами СР образуются ярко выраженные локальные минимумы аксиальной скорости потока, которая принимает значения 0,5–0,8 (рис. 7). В областях ячеек, не занятых пластинами СР, величина безразмерной аксиальной скорости составляет 0,7–1,0. В соседней ТВС без СР аксиальная скорость во всем поперечном сечении исследуемой области составляет 1,0–1,2. На расстоянии $L/d_e = 2,5$ от СР наблюдается начало процесса выравнивания поля аксиальной скорости, а ее величина лежит в диапазоне 0,90–1,05.

Исследования гидродинамики в однородной и смешанной активных зонах показали, что СР не оказывают существенного влияния на формирование поперечных течений и вихревых структур за смесительными лопатками ПДР.

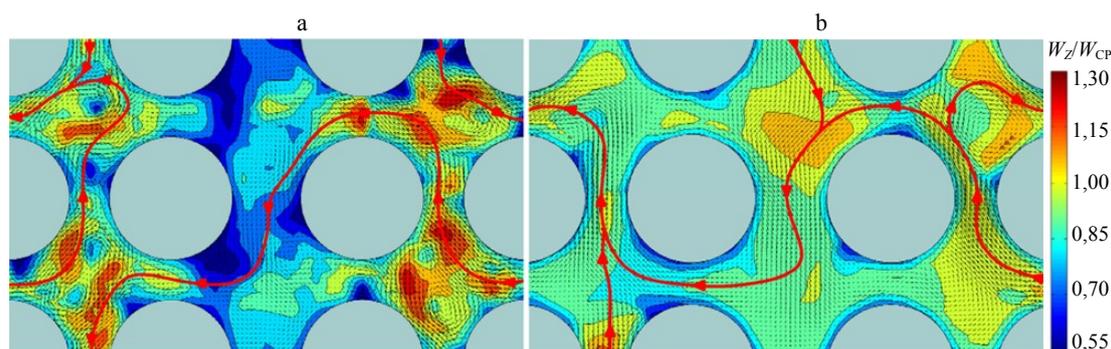


Рис. 6. Распределение аксиальной скорости потока в смешанной активной зоне:
а – при относительной координате $L/d_r = 1,8$; б – $10,2$

Fig. 6. Distribution of axial flow velocity in the mixed core:
а – at relative coordinate $L/d_r = 1.8$; б – 10.2

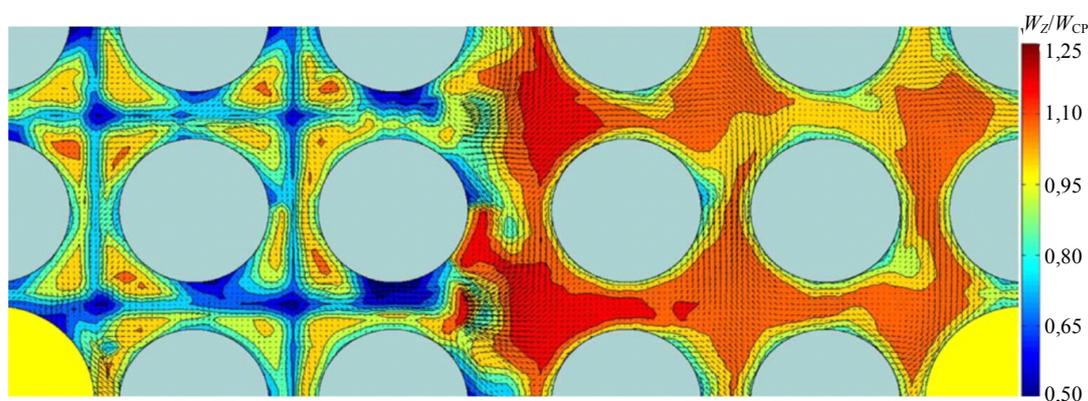


Рис. 7. Поле аксиальной скорости в смешанной активной зоне

Fig. 7. Axial velocity field in a mixed core

Поперечные потоки и вихревые структуры, а также длины их затухания и рассеяния за лопатками ПДР одинаковы для смешанной и однородной активных зон.

ВЫВОДЫ

Исследования гидродинамики теплоносителя в однородной и смешанной активных зонах реакторов PWR с ТВС-Квадрат позволили заключить следующее:

1. В гладком пучке твэлов формирование поперечных течений обусловлено процессом перераспределения части потока из зазора между ТВС-Квадрат в сами сборки, а также геометрическими особенностями твэльного пучка. В периферийных ячейках и зазорах между ТВС величина относительной поперечной скорости составляет $0,04-0,05$, а максимальная поперечная скорость возникает в межтвэльных зазорах и составляет $0,05-0,08$.

2. В однородной активной зоне стабилизирующие решетки не оказывают влияния на формирование поперечных потоков за перемешивающими дистанционирующими решетками.

Поперечные течения, возникающие при обтекании стабилизирующих решеток, нивелируются воздействием лопаток ПДР на поток теплоносителя.

3. Процесс образования поперечных потоков между соседними ТВС-Квадрат протекает за счет макротечений, возникающих за перемешивающими дистанционирующими решетками и ориентированных согласно расположению смесительных лопаток. Величина относительной поперечной скорости в макротечениях составляет $0,15-0,30$.

4. В смешанной активной зоне стабилизирующие решетки влияют на формирование поля аксиальных скоростей. Обтекание потоком стабилизирующих решеток характеризуется неоднородностью аксиальной скорости, которая выражается в появлении зон с более низкой аксиальной скоростью за пластинами решетки. Относительная аксиальная скорость в данных областях лежит в диапазоне $0,5-0,8$. При удалении от стабилизирующих решеток наблюдается интенсивный процесс выравнивания аксиальных скоростей между всеми типами ячеек

и на расстоянии $L/d_f = 2,5$ от СР ее значения составляют 0,90–1,05.

Полученные результаты могут быть использованы для обоснования конструкции и режимов работы активной зоны реактора PWR с ТВС-Квадрат, а также верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон ядерных реакторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE–2021–0008).

ЛИТЕРАТУРА

1. Топливо для ВВЭР и PWR. Современное состояние и перспективы / Д. Л. Зверев [и др.] // Атомная энергия. 2020. Т. 129, № 2. С. 63–64.
2. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С. М. Дмитриев [и др.]. М.: Машиностроение. 2013. 413 с.
3. Hydrodynamic Analysis of a Flow in a Mixed Core / A. S. Noskov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1359, Is. 1. P. 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012084>.
4. Bieder, U. CFD analysis of Intra and Inter Fuel Assembly Mixing / U. Bieder, C. Genrault // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 135. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.106977>.
5. Bieder, U. Hydraulic Forces Acting on Full Cross Section Fuel Assemblies with 17×17 Fuel Rods / U. Bieder, C. Genrault, P. Ledac // Progress in Nuclear Energy. 2020. Vol. 130. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103515>.
6. Influence of Spacer Grid Outer Strap on Fuel Assembly Thermal Hydraulic Performance / W. Li [et al.] // Science and Technology of Nuclear Installations. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/602062>.
7. Semi-Analytical Modeling of the Flow Redistribution Upstream From the Mixing Grids in a Context of Nuclear Fuel Assembly Bow / G. Campioni [et al.] // Nuclear Engineering and Design. 2021. Vol. 371. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110940>.
8. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. Изд. 2-е доп. и перераб. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
9. Гидродинамические особенности течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / О. Б. Самойлов [и др.] // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 32–38. <https://doi.org/10.1134/S0040363619040076>.
10. Изучение гидродинамических процессов течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR с различными перемешивающими дистанционирующими решетками / С. М. Дмитриев [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 5. С. 725–734.
11. Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 258–268.
12. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С. М. Дмитриев [и др.] // Приборы и методы измерений. 2015. Т. 6. № 2. С. 188–195.

Поступила 30.03.2023

Подписана к печати 25.04.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Zverev D. L., Samoilov O. B., Romanov A. I., Panov V. A., Fal'kov A. A., Sholin E. V., Zotov S. A. (2020) Fuel for VVER and PWR: Current Status and Prospects. *Atomic Energy*, 129 (2), 51–53. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00720-z>.
2. Dmitriev S. M., Zverev D. L., Bykh O. A., Panov Yu. K., Sorokin N. M., Farafonov V. A. (2023) *The Main Equipment of Nuclear Power Plants with Thermal Reactors*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 413 (in Russian).
3. Noskov A. S., Falkov A. A., Shipov D. L., Lukyanov V. E., Morozkin O. N. (2019) Hydrodynamic Analysis of a Flow in a Mixed Core. *Journal of Physics: Conference Series*, 1359, 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012084>.
4. Bieder U., Genrault C. (2020) CFD Analysis of Intra and Inter Fuel Assembly Mixing. *Annals of Nuclear Energy*, 135, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.106977>.
5. Bieder U., Genrault C., Ledac P. (2020) Hydraulic Forces Acting on Full Cross Section Fuel Assemblies with 17×17 Fuel Rods. *Progress in Nuclear Energy*, 130, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103515>.
6. Yan J., Zhang Y., Yang B., Li W., Zhou Y. Influence of Spacer Grid Outer Strap on Fuel Assembly Thermal Hydraulic Performance. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2014, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/602062>.
7. de Lambert S., Cardolaccia J., Faucher V., Thomine O., Leturcq B., Campioni G. (2021) Semi-analytical modeling of the Flow Redistribution Upstream From the Mixing Grids in a Context of Nuclear Fuel Assembly Bow. *Nuclear Engineering and Design*, 371, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110940>.
8. Gukhman A. A. (1973) *Introduction to Similarity Theory*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 296 (in Russian).
9. Samoilov O. B., Noskov A. S., Shipov D. L., Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Pronin A. N., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2019) Hydrodynamic Features of the Flow Downstream from the Mixing Spacer Grid in a Kvadrat Fuel Assembly in PWRs. *Thermal Engineering*, 66 (4), 243–248. <https://doi.org/10.1134/S0040601519040074>.
10. Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2018) The Study of Hydrodynamic Processes of a Coolant Flow in FA-Kvadrat PWR with Various Mixing Spacer Grids. *Thermophysics and Aeromechanics*, 25 (5), 695–703. <https://doi.org/10.1134/S0869864318050062>.
11. Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Khrobostov A. E., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Sorokin V. D., Yudin A. V. (2018) Regularities of the Coolant Flow Formation Behind the Mixing Grid TVS-Kvadrat for PWR. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 258–268. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-258-268> (in Russian).
12. Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Legchanov M. A., Khrobostov A. E. (2015) Application of Multihole Pressure Probe for Research of Coolant Velocity Profile in Nuclear Reactor Fuel Assemblies. *Pribory i Metody Izmereniy = Devices and Methods of Measurements*, 6 (2), 188–195 (in Russian).

Received: 30.03.2023

Accepted: 25.04.2023

Published online: 31.07.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок

Часть 2

Канд. техн. наук Т. В. Рыжова¹⁾, Д. Н. Бухаров²⁾, докт. физ.-мат. наук, проф. С. М. Аракелян²⁾

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

²⁾Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Российская Федерация)

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

Аннотация. В данной статье находят дальнейшее развитие модельные исследования по проведению аналогий возникновения возможных неоднородностей и дефектов фрактального типа на поверхности различных объектов под действием лазерного излучения в разных условиях и схемах лазерного имитационного эксперимента в сравнении с реальными процессами в камерах тепловых машин из-за контактов рабочего вещества с их поверхностью. Предмет такого рассмотрения связан с тем, что в лазерных схемах можно относительно легко и регулируемым образом управлять их топологией в разных модификациях (в диапазоне $1D-3D$ структур, образующихся на поверхностях разной геометрической формы фрактального типа). Это дает большие возможности для изучения различных часто возникающих нежелательных случайных дефектов и неоднородностей сложной конфигурации с развитием неожиданных процессов при динамических режимах работы энергетических установок разного типа в условиях их реальной эксплуатации и определяется с помощью геометрического анализа в рамках соответствующих нелинейных моделей с различными нелинейными фрактальными образами. Нами использовались в данном аспекте две модели для рассмотрения развития возникающих фрактальных трещиноватых структур: во-первых, диффузионное распространение/рост трещин разной геометрии с совокупностью локальных отрезков и фрагментов в различных направлениях; во-вторых, с диффузно-ограниченной агрегацией их распространения (*Diffusion-Limited Aggregation – DLA*) с использованием формализма клеточных автоматов в перколяционном приближении для разных алгоритмов образования фрактальных структур. Приведем только итоговые результаты расчетов без деталей их процедуры, что достаточно для наглядного и качественного определения процесса роста трещиноватости и дефектов. При этом конечной целью рассмотрения является изучение возникновения возможных и контролируемых локальных областей/коллекторов, начиная с поверхностных структур, и их ассоциация с реальными объектами на поверхности камер с рабочим веществом в энергосистемах. Обсуждается возможная практическая значимость подобного моделирования и анализа.

Ключевые слова: фрактальные модели, поверхностные дефекты и трещиноватые структуры, клеточные автоматы, перколяция, лазерно-индуцированные управляемые процессы, нелинейные образы, аналогия с энергетическими тепловыми установками, рабочее вещество в камере

Для цитирования: Рыжова, Т. В. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Часть 2 / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, С. М. Аракелян // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 333–341. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341>

Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units

Part 2

T. V. Ryzhova¹⁾, D. N. Bukharov²⁾, S. M. Arakelyan²⁾

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

²⁾Vladimir State University A.G. and N. G. Stoletovs (Vladimir, Russian Federation)

Abstract. The paper describes further development of model studies with the purpose to draw analogies of the occurrence of possible inhomogeneities and defects of the fractal type on the surface of various objects under the action of laser radiation

Адрес для переписки

Рыжова Татьяна Викторовна
Белорусский национальный технический университет
Партизанский проспект, 77,
220107, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 250-36-95
tatsiana.rizhova@yandex.by

Address for correspondence

Ryzhova Tatiana V.
Belarusian National Technical University
77, Partizansky Ave.,
220107, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 250-36-95
tatsiana.rizhova@yandex.by

for different conditions and schemes of a laser simulation experiment in comparison with real processes in the chambers of thermal machines due to the contacts of the working substances with their surface. The subject of this consideration is related to the fact that in laser schemes one can relatively easily and in a controlled manner to study their topology in various modifications (in the range of 0D–3D structures formed on surfaces of various geometric shapes of the fractal type). This provides great opportunities for studying various frequently occurring undesirable random defects and inhomogeneities of complex configuration with the development of unexpected processes in the dynamic modes of operation of various types of power units in their actual operation. This is determined by geometric analysis within the framework of the corresponding non-linear models with different non-linear fractal images. In this aspect, we have used two models to consider the development of emerging fractal fractured structures: first, diffusion propagation/growth of cracks of different geometry with a set of local segments and fragments in different directions; secondly, with diffusely limited aggregation of their distribution (Diffusion-Limited Aggregation – DLA) using the formalism of cellular automata in percolation approximation for different algorithms for the formation of fractal structures. We present only the final results of calculations without details of their procedure, which is sufficient for a visual and qualitative determination of the process of growth of fracturing and defects. In this case, the final goal of consideration is to study the emergence of possible and controllable local areas / collectors, starting from surface structures, and their association with real objects on the surface of chambers with a working substance in power systems. The possible practical significance of such modeling and analysis is discussed to forecast their working conditions.

Keywords: fractal models, surface defects and fractured structures, cellular automata, percolation, laser-induced controlled processes, nonlinear images, analogy with energetic thermal units, working substance in the chamber

For citation: Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan S. M. (2023) Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units. Part 2. *Science and Technique*. 22 (4), 333–341. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341> (in Russian)

Модели и алгоритмы рассмотрения формирования трещиноватости

В рамках данного подхода концептуально рассматриваются определенные правила присоединения групп дополнительных отрезков трещин к выделенной исходной линейной оси фрагмента доминирующей трещины, направление которой задается сложившейся анизотропией роста трещины под внешним однонаправленным воздействием, но без фиксации, по какой причине это происходит. Речь идет о следующем объекте – поверхности камеры с рабочим веществом тепловой установки. Это сделаем на примере наиболее удобной для этого диффузно-ограниченной агрегации (*DLA*-модели), позволяющей генерировать структуры трещиноватости с фрактальными размерностями из указанных выше отрезков трещин и учитывать различные дестабилизирующие процессы при их формировании.

Модель трещины в приближении *DLA* была реализована как клеточный автомат с окрестностью Мура [1, 2]. Влияние характеристик ее окружения в трещиноватой поверхности камеры учитывалось в коэффициенте вероятности консолидации разных отрезков (вероятностный параметр p), который представлялся нормированным коэффициентом вероятности для случайного пространственного развития трещиноватости из интервала обычных значений для вероятности p (0; 1].

Алгоритм построения модели центральной трещины с новыми отрезками в *DLA*-приближении формировался из нижеследующих этапов (рис. 1): 1) на этапе инициализации в расчетной области с наложенной равномерной сеткой генерировалась стартовая структура, состоящая из системы ячеек – элементов-зародышей трещин, расположенных на нижней границе, а также задавался размер центральной трещины (максимальное число элементов в расчетной области); 2) на верхней границе расчетной области генерировалось заданное количество отрезков трещин; 3) они совершали случайные смещения вниз и в стороны с одинаковой или различной вероятностью; 4) в случае их приближения к занятой ячейке расчетной области в рамках окрестности Мура реализовывалась их агрегация к занятой ячейке, иначе бы движение продолжалось; 5) такие шаги повторялись 2–4 раза. Критерием остановки данного итерационного процесса роста трещин-отрезков было достижение центральной трещиной требуемого размера, когда количество элементов в расчетной области достигало заданного значения и/или происходило касание трещины верхней границы ее проникновения (в финале – выход на наружную поверхность камеры), и/или реализовывалась остановка роста внутри камеры (тупиковая, висячая ветвь).



Рис. 1. Алгоритм построения модели центральной трещины с новыми отрезками в DLA-приближении:
 а – схема модели DLA развития трещины (красный квадрат – это новый элемент; зигзагообразная линия – это случайное удаление; синие квадраты – это совокупные элементы; зеленые квадраты – это начальная стартовая структура); б – окрестность Мура

Fig. 1. Algorithm for constructing a model of a central crack with new segments in the DLA-approximation:
 а – DLA model diagram for fracture propagation (red-square is a new element; zig-zag line is a random removal; blue squares are the aggregate elements; green squares are the initial start structure);
 б – the Moore area

На рис. 2 приведены модельные изображения трещин в приближении DLA в условной расчетной области размером 300×300 о. е. для 30000 элементов. На рис. 2а представлен случай равновероятного смещения присоединяющихся отрезков блуждающих трещин при постоянном значении вероятности $p = 1$. На рис. 2б представлена модель системы трещин для малых боковых смещений, возникающих/блуждающих отрезков при равномерном уменьшении вероятности их консолидации, начиная со значения вероятности $p = 1,00$ до $p = 0,01$. На рис. 2с сгенерирована система трещин для малых боковых смещений блуждающих отрез-

ков при равномерном уменьшении вероятности консолидации трещин, начиная со значений вероятности от $p = 0,50$ до $p = 0,01$.

Случай малых боковых смещений блуждающих отрезков трещин позволил на качественном уровне учесть действие анизотропии трещиноватости в камере под влиянием однонаправленного внешнего воздействия разной природы, когда рост структуры реализуется преимущественно по направлению этой выделенной анизотропии. Указанный выше характер изменения вероятности консолидации новых отрезков трещин соответствовал случаю процесса стабилизации системы трещиноватости.

Для разных значений вероятности p процесс генерации новых отрезков трещины останавливался вследствие достижения трещиной верхней границы выбранной области расчета, что соответствует выходу трещины на поверхность и/или ее изоляции внутри поверхности камеры. Сравнивая рис. 2а, б, с, можно заключить, что вероятности случайных боковых смещений отрезков трещин влияют на форму трещины в целом. Так, в случае малых вероятностей боковых смещений для появления новых отрезков трещин они генерируются более вытянутыми по вертикали с меньшей величиной и количеством боковых ответвлений.

Переход к абсолютным единицам, если имеются данные натурных измерений параметров трещиноватости (например, на определенных фрагментах тестовых тепловых установок) и/или по физическим локальным моделям на определенных участках камеры, позволяет провести сравнение модельных и экспериментальных результатов в аспекте оценки длин моделируемых структур.

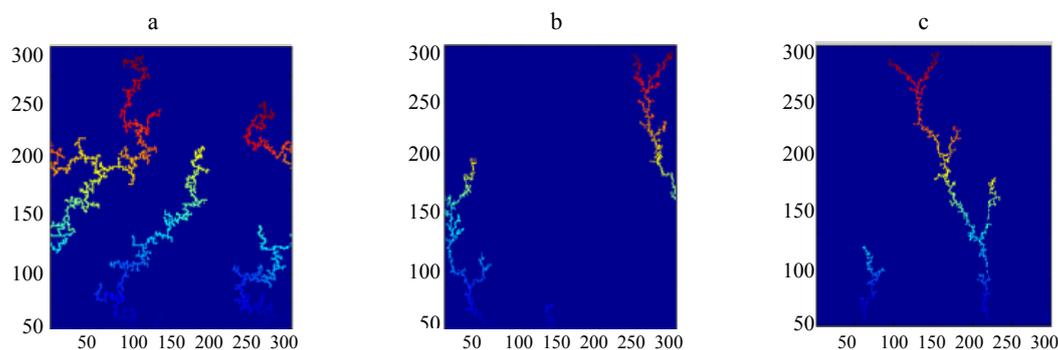


Рис. 2. Модели системы трещин в приближении DLA: а – равновероятные смещения возникающих/блуждающих отрезков трещин при постоянном значении вероятности $p = 1$ их образования; б – малые боковые смещения блуждающих отрезков трещин: равномерное уменьшение величины вероятности от значений $p = 1,00$ до $p = 0,01$;
 с – равномерное уменьшение вероятности p от 0,50 до 0,01

Fig. 2. Models of the crack system in the DLA-approximation: а – equiprobable displacements of emerging/wandering crack segments at a constant value of the probability $p = 1$ of their formation; б – small lateral displacements of wandering fracture segments: a uniform decrease in the probability value from $p = 1$ to $p = 0.01$; с – uniform decrease in probability p from 0.5 to 0.01

Задав длину стороны ячейки, например 1 мм (это определяется тем, какая проницаемость рабочего вещества и ее режим нами оценивается), получим максимальную длину в пределах 300–390 мм для случая равновероятных смещений. Это может соответствовать возникновению трещин при слабой анизотропии из-за наличия какого-либо направленного внешнего воздействия. Рамочные ограничения максимальной длины от 300 до 340 мм в случае малых боковых смещений могут соответствовать образованию трещин в случае более сильной анизотропии из-за внешнего воздействия.

Такие значения качественно верно могут отражать результаты трещинообразования на экспериментальных установках при их испытаниях в процессе конструирования под конкретные условия эксплуатации (ср. с моделями [2]), что и покажет реальную степень адекватности предложенной модели. Это должно позволить оценить последствия образования трещиноватости разной конфигурации на внутренних поверхностях камеры с рабочим веществом в тепловых энергетических установках.

Однако данное сопоставление представляет непростую задачу и может быть востребованным в специальных случаях, включая, например, ударные воздействия, сильные вибрации и ускорения в возимых энергетических установках, которые отличаются от стандартных условий эксплуатации в стационарных режимах. Тем не менее и для последнего случая такое моделирование может быть полезным при длительной их эксплуатации и проведении профилактики и планового технического обслуживания, а тем более при возникновении нестационарных процессов с переменными нагрузками во внешних энергетических сетях.

На типологию трещин также оказывают влияние величина и форма исходных элементов/очагов, из которых они формируются. Это отражено на рис. 3а, b, c, d. Так, в случае вертикальных структурных элементов общая форма трещин преимущественно вертикальная (рис. 3d). Когда элементы трещин обладают диагональной формой – ее форма также диагональная. В случае длинных структурных элементов вертикальной формы трещина достигает критической длины по техническим условиям за почти в два раза меньшее количество итераций – временных шагов ее развития.

Анализируя величину боковых ветвей полученных трещин, можно установить, что в случае вертикального роста она минимальна и не превосходит 1–3 мм в принятых нами единицах, что значительно меньше длины всей центральной трещины.

На форму оказывает влияние также стартовая структура, от которой происходит рост сети трещин. Так, на рис. 4 приведены изображения фрагментов трещин в рамках приближения *DLA* для окрестности Неймана, которая состоит из четырех исходных элементов и формируется из окрестности Мура удалением четырех диагональных ячеек. В качестве затравочной структуры использовался вертикальный фрагмент трещины шириной 1 о. е. (в нашей модели 1 мм). В данном случае процесс агрегации трещины не останавливался при достижении требуемой длины. Генерация системы трещин происходила до тех пор, пока было выполнено условие $N/S < \rho$, где N – количество отрезков в расчетной области; S – площадь расчетной области; ρ – относительная их поверхностная плотность. Так, на рис. 4 варьировались вероятность консолидации отрезков трещин в единую структуру при $\rho = 0,1$ и толщина ее структурных элементов.

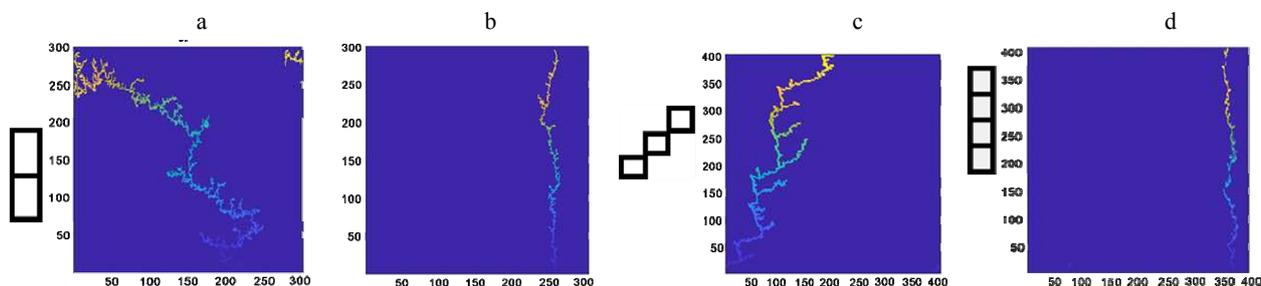


Рис. 3. Модели системы трещин в приближении *DLA* при вероятности $p = 1$: фрагмент вертикальных трещин из двух исходных элементов: а – равновероятный рост (слева), б – преимущественно вертикальный рост (справа); с – фрагмент диагональных трещин из исходных трех элементов; д – то же вертикальных трещин из четырех исходных элементов

Fig. 3. Models of the crack system in the *DLA*-approximation with probability $p = 1$: fragment of vertical cracks from two initial elements: a – equiprobable growth (left); b – predominantly vertical growth (right); c – fragment diagonal cracks from the original three elements; d – the same vertical cracks from the four original elements

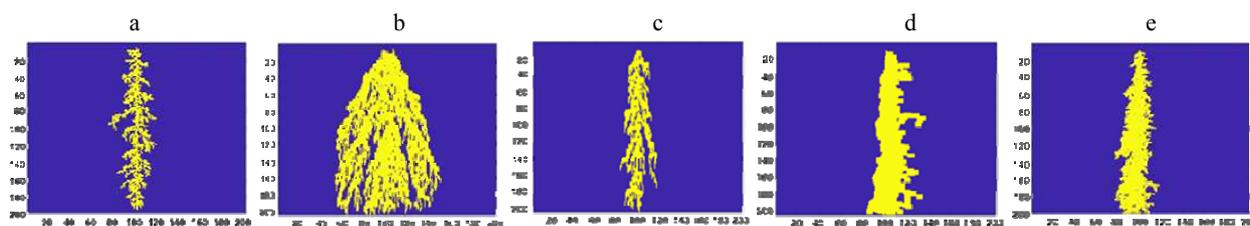


Рис. 4. Модели системы трещин в приближении *DLA*: а – единичный исходный структурный элемент, вероятность $p = 1,0$; б – $p = 0,5$, структурный исходный элемент из пяти единиц/элементов, равновероятный рост; в – $p = 0,1$, структурный элемент из пяти единиц, вертикальный рост; д – $p = 0,5$, структурный исходный элемент из пяти единиц, равновероятный рост шириной 10 о. е., вертикальный рост; е – $p = 0,5$, структурный исходный элемент из пяти единиц шириной 5 о. е., вертикальный рост

Fig. 4. Models of the crack system in the *DLA*-approximation: а – single initial structural element, probability $p = 1.0$; б – $p = 0.5$, structural initial element of five units/elements, equiprobable growth; в – $p = 0.1$, structural element of five units, vertical growth; д – $p = 0.5$, structural initial element of five units, equiprobable growth with width of 10 in arbitrary units, vertical growth; е – $p = 0.5$, structural initial element of five units with width of 5 in arbitrary units, vertical growth

Для указанного случая максимальная величина отклонения боковых ответвлений трещин не больше 2 о. е. (20 мм для вертикального роста) (рис. 4а, б). При равновероятном росте с разной шириной (рис. 4д, с, д) максимальная величина отклонения боковых веток трещин увеличивается до 5 о. е. (50 мм).

Толщина структурных элементов, как и их длина, оказывает значительное влияние на форму смоделированных трещин – в случае широких и длинных элементов их форма становится более однородной, наблюдается хорошая наполненность структуры. При этом соответственно фрактальная размерность значительно увеличивается при постоянной вероятности консолидации новых отрезков трещин и стремится от значений порядка 1,60 к 1,90 (2D-структура) или даже 2,02 (3D-фрагменты) в виде «деревьев» в проекции на горизонтальную плоскость разреза камеры.

Полученные модельные типы трещин и будут определять их проницаемость для рабочего вещества при динамических процессах подобного развития трещиноватости в камере тепловой установки с учетом возникающей карты давлений в такой 3D-сети. Это может в итоге приводить не только к понижению эффективности работы тепловой машины, но и к ее разрушению.

Аналоги формы возникновения коллекторных замкнутых зон/кластеров на внутренней поверхности камеры в контакте с рабочим веществом

Выше мы рассматривали развитие трещин в камере тепловой установки в модели домини-

рующих 1D-структур в условиях их возможной консолидации друг с другом в некоторые конфигурации за счет появления боковых отрезков – ветвления трещин, которые могут обеспечивать их пересечение.

Сейчас кратко остановимся на возможности процессов образования трещиноватых зон (кластеров) на внутренней поверхности камеры, где может аккумулироваться рабочее вещество в некотором стабильном состоянии до появления неустойчивого режима из-за внешних воздействий, приводящих к выбросу рабочей массы из такого коллектора по всей системе трещин.

Подобные коллекторы – пустотные дефектные зоны (кластеры), возникающие по разным причинам в камере, – удобно моделировать в рамках перколяционной модели, когда исходный этап формирования такой зоны начинается с очага напряжения – будущего его процесса разгрузки и в дальнейшем – с образованием дефекта. Далее он приводит к распространению от него напряжений с образованием характерной перколяционной фрактальной трещиноватой неоднородной структуры с возможной локализацией в определенной области на внутренней поверхности камеры с рабочим веществом.

Один из подходов такого моделирования сводится к следующему (приближение направленной перколяции по методу Эдена, ср. с [3]).

Как и в случае *DLA*, в модели Эдена фрактальная трещиноватость конфигурации дефектов в виде кластеров начинает генерироваться от начальной структуры в заранее заданной точке, расположенной в выбранной расчетной

области с наложенной на нее двумерной решеткой. В дальнейшем кластеры формируются путем добавления отрезков/ячеек трещиноватости по периметру такой решетки по определенному правилу выбранной модели.

На рис. 5 показаны возможные направления роста трещиноватого кластера Эдена, представленные окрестностями клеточного автомата порядка 1: в двух подходах – формализма Неймана (рис. 5a) и формализма Мура (рис. 5b). Соседей занятого участка определяют как четыре участка роста трещин (верхний, нижний, левый и правый, рис. 5a) или как восемь участков роста (рис. 5b). Каждая ячейка роста трещины, расположенная по периметру, имеет равные шансы быть выбранной и с заданной вероятностью добавленной в кластер.

На рис. 5 в центре закрашенная окружность – затравочная структура, незакрашенные окружности – распространяющиеся ячейки роста. Окрестность Неймана предоставляет четыре направления роста: вверх, вниз, влево и вправо (рис. 5a); окрестность Мура добавляет еще четыре диагонали к рис. 5a так, что появляются восемь направлений роста (рис. 5b).

Это промоделировано на рис. 6. Такой перколяционный трещиноватый кластер дефектов может быть построен путем применения клеточного автомата с различными функциями соседства (окрестностями), когда динамика роста рассматривается в динамике так называемых эпох развития трещиноватой структуры во времени.

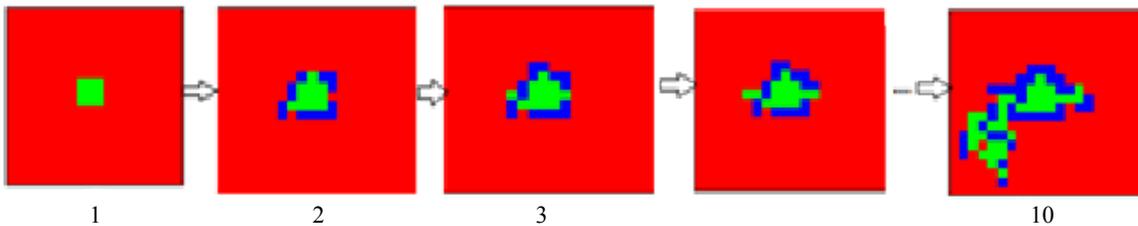


Рис. 6. Состояние расчетной области клеточного автомата после эпох 1–10 роста при реализации модели направленной перколяции

Fig. 6. Development process for the cellular automata calculation areas after epochs 1–10 of growth during implementation of directional percolation model

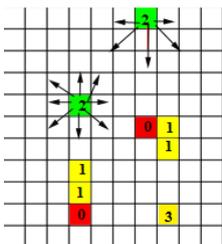


Рис. 7. Схема движения ячеек в рамках клеточного автомата с окрестностью Мура

Fig. 7. Scheme of cell movement within cellular automata with Moore's neighborhood

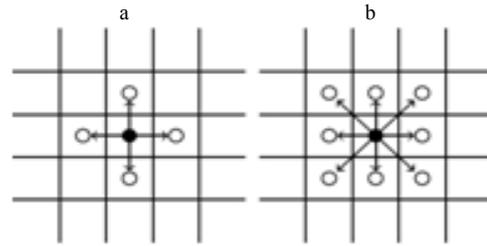


Рис. 5. Схема возможных направлений роста кластера Эдена: закрашенные черные круги – начальная площадь участка; открытые круги показывают направления роста застройки; а – для алгоритма Неймана выбираются 4 направления роста (вверх, вниз, влево, вправо); б – для алгоритма Мура необходимо добавить еще 4 диагональных направления, тогда возникает 8 направлений роста

Fig. 5. Scheme of possible growth directions for the Eden cluster: paint over circle is the initial ground area; open circles show the directions of development growth; a – for the Neiman algorithm 4 directions of growth occur (up, down, left, right); b – for the Moore algorithm the 4 diagonal directions have to be added, and then 8 growth directions occur

Нами и была разработана модификация указанной выше модели, для которой учитывалось время жизни ячеек трещиноватости и дефектов, правила движения/роста которых формировались на основе окрестности Мура (рис. 7). Ячейки выбрасывались в пространство с верхней границы расчетной области, двигались по ней до тех пор, пока не консолидировались с заданной вероятностью к затравочным или уже сформированным структурам дефектов, или пока их время жизни не заканчивалось. Если время жизни заканчивалось, то новая ячейка останавливалась в текущей ячейке сети и вокруг нее мог формироваться новый агрегат.

Для построения перколяционного фрактала в рамках ячеистой перколяции роста трещин и дефектов расчетная область разбивается равномерной сеткой, образуя ячейки. Они заполняются случайным образом, так что содержат 0 (пустой участок) или 1 (занятый участок) с заданной вероятностью p . Группа занятых ячеек решетки образует итоговую зону/кластер трещиноватости в виде деревьев [4].

Не останавливаясь на деталях, приведем совокупность одной из возможных конфигураций дефектов, образующихся на внутренней поверхности камеры (зон/кластеров) (рис. 8), так называемый фрактал Жюлия. Видно, что форма фрактальных структур дефектов варьируется от дендритной до округлой и от единичной до множественной.

Изображения ряда полученных в итоге совокупности таких дефектов на внутренней поверхности рабочей камеры энергетической установки – консолидированных фрактальных структур – в этом случае приведены на рис. 9.

Таким образом, в трещиноватой внутренней поверхности камеры с дефектами, вероятно, возникают конфигурации ансамбля пустот/коллекторов, где могут аккумулироваться массы рабочего вещества. Они являются сложными и отнюдь не сводятся к простым областям с непрерывными регулярными границами. Но в любом случае представленные нами модельные конфигурации могут рассматриваться как базовые локальные шероховатости к таким общепринятым дефектам в камере, существенно меняющим их функционирование и КПД теплового генератора, а также с учетом механизмов их дальнейшего

развития вплоть до разрушения объекта. Особенно это важно в аспекте оценки возможностей их внезапного высвобождения от масс рабочего вещества с выходом наружу с выхлопом триггерного типа из таких локализованных объемов с дефектами. Такое явление может происходить под действием разных внешних причин, перестраивающих 3D-сеть в трещиноватом массиве камеры, с возможными нежелательными последствиями для режимов работы всей энергетической установки в целом.

Поэтому явно недостаточно представлены данные явлений с возникающей трещиноватой сетью в рабочей камере в рамках простых моделей, определенных регулярных гидравлических систем, пусть даже довольно сложного вида (ср. с [5–8]). Оно является только весьма условным и может служить в качестве предварительного универсального анализа трендов и тенденций в единой пневмогидравлической системе тепловой машины. Но всегда требуется для практических целей учет ее специфики в конкретной установке, принципиально определяющей динамический режим функционирования и развития 3D-системы трещиноватости внутренней поверхности рабочей камеры и возможных последствий выхода рабочего вещества наружу с наступлением даже катастрофического события, особенно из-за действия внешних нестационарных процессов и неустойчивостей во внешней динамической среде (ср. с [9–12]) при экстремальных условиях [13,14]. Контроль жизненного цикла таких явлений можно анализировать в рамках моделей [15–18].

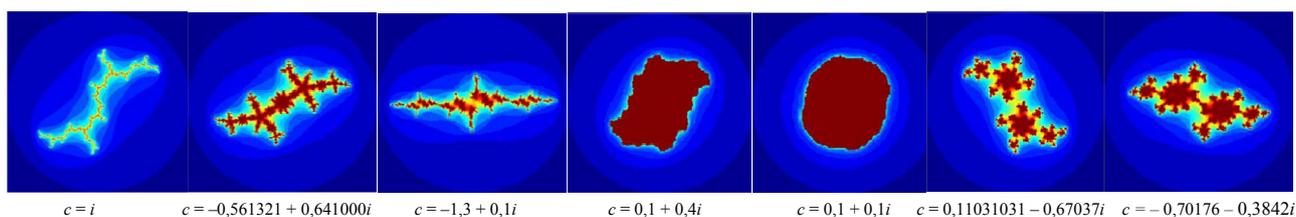


Рис. 8. Геометрическая фрактальная модель Жюлия для трещиноватости и дефектов

Fig. 8. Geometric fractal Julia model for fractures and defects

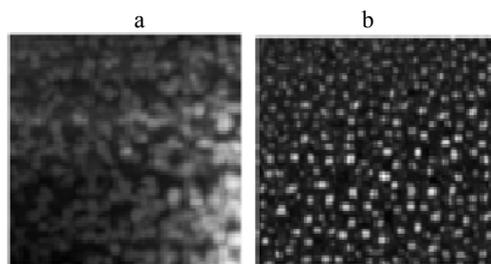


Рис. 9. Изображения полученного ансамбля фрактальных кластерных структур из-за образовавшихся дефектов: а – множество Жюлия; б – перколяционный механизм. (Можно провести аналогию с состоянием внутренней поверхности камеры в контакте с рабочим веществом тепловой установки при возникновении на ней неоднородностей)

Fig. 9. Images of the resulting ensemble of fractal cluster structures due to the formed defects: а – Julia set; б – percolation mechanism. (It is possible to draw an analogy with the state of the inner chamber surface being in contact with the working substance in the thermal plant in the event of inhomogeneities on it)

ВЫВОДЫ

1. Приведено общее качественное рассмотрение моделирования процессов как осаждения материалов на твердую поверхность различных сложных конфигураций, так и возникновения ее трещиноватости и дефектов фрактальных типов. Процедуры моделирования для такого анализа имеют достаточно универсальный характер в рамках определенных подходов, допускающих контролирование и регулирование развитием таких стохастических динамических нелинейных процессов.

2. Прослежены сходная динамика и аналогия формирования подобных структур, с одной стороны, в демонстрационных исследованиях и управляемом моделировании при лазерном поверхностном осаждении веществ разного состава и при воздействии лазерного излучения на подложку и материалы, включая газожидкостные и капельно-коллоидные системы с соответствующими физико-химическими процессами. Но, в то же время, данные процессы развиваются и в реальных высокотемпературных теплотехнологических жидкостно-газовых тепловых энергетических машинах разного типа. Это позволяет проводить мониторинг, предварительно оценивать их состояние в аспекте эффективности работы и прогнозировать безопасность работы в различных условиях и режимах.

3. В результате удается провести как численное и имитационное моделирование регулируемым образом возникающих динамических структур и неустойчивостей, так и разработать методы управления их конфигурацией и характеристиками в тестовых экспериментах по выявлению особенностей их жизненного цикла в условиях заданного регулирования развития динамических процессов.

4. Рассмотренные явления взаимодействия рабочего вещества в конкретных энергетических установках с внутренней поверхностью их технологических камер могут приводить к появлению определенных фиксированных стационарных зон локализации дефектов и трещиноватости разной конфигурации в них при состоянии рабочего вещества в разных физических условиях, которое выпадает из непрерывного цикла динамических процессов теплонагрева при эксплуатации тепловых установок. Это, с одной стороны, ведет к понижению эффективности и КПД тепловых машин, с другой – такие исходные локализованные

зоны (даже незначительные), являясь по сути очагами дефектов, стимулируют дальнейшее развитие неоднородностей и трещин на внутренних поверхностях тепловых камер, которые со временем могут трансформироваться в механические повреждения и разрушения. Для тепловых установок это может приводить к катастрофическим последствиям.

5. Можно считать, что рассматриваемая предварительная диагностика и моделирование таких очагов неоднородностей в процессах их возникновения и проведение неразрушающего контроля являются неотъемлемой частью эксплуатации тепловых установок в аспекте их технического обслуживания. Данный анализ удобно проводить в рамках подхода по аналогии с лазерными экспериментами с разными объектами и материалами, в которых можно детально исследовать подобные динамические явления с неустойчивостями и неоднородностями и управлять ими в заданном направлении уже на начальной стадии их возникновения в пространственных микро- и наномасштабах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zaitsev, D. A. A Generalized Neighborhood for Cellular Automata / D. A. Zaitsev // *Theoretical Computer Science*. 2017. Vol. 666. P. 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
2. Goldenberga, J. Using Cellular Automata Modeling of the Emergence of Innovations / J. Goldenberga, S. Efronib // *Technological Forecasting & Social Change*. 2001. № 68. P. 293–308.
3. Богданова, Е. А. Имитационное моделирование как инструмент принятия решений / Е. А. Богданова, А. А. Шерстянкина // *Novaum*. 2017. № 6. С. 25–28.
4. Козлов, Г. В. Кластерная модель аморфного состояния полимеров / Г. В. Козлов, В. У. Новиков // *УФН*. 2001. Т. 171, № 7. С. 717–764. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0171.200107b.0717>.
5. Хрусталева, Б. М. Техническая термодинамика: учеб.: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. Минск: Технопринт, 2004. Ч. 1. 486 с.
6. Техническая термодинамика: учеб. / В. И. Крутов [и др.]; под ред. В. И. Крутова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 384 с.
7. Несенчук, А. П. Тепловые расчеты пламенных печей для нагрева и термообработки металла / А. П. Несенчук, Н. П. Жмакин. Минск: Высшая школа, 1974. 295 с.
8. Гликман, Б. Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б. Ф. Гликман. М.: Наука, 1986. 368 с.
9. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / В. Я. Панченко [и др.]; под ред. В. Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
10. Введение в фемтонанопонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения

- и диагностики наноструктурированных материалов: учеб. пособие / С. М. Аракелян [и др.]; под общ. ред. С. М. Аракеяна. М.: Логос, 2015. 744 с.
11. Осаждение биметаллических кластеров Au/Ag с использованием метода лазерного осаждения наночастиц из коллоидных систем / А. А. Антипов [и др.] // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116, № 2. С. 349–352. <https://doi.org/10.7868/S0030403414020032>.
 12. Шашин, В. М. Гидромеханика: учеб. / В. М. Шашин. М.: Высшая школа, 1990. 384 с.
 13. Рекуператор для регенеративного теплоиспользования тепловых отходов промышленных печей: патент № 13292 Республика Беларусь: МПК (2009) F27D17/00 / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, А. П. Ракомсин [и др.]. Опубл. 2010.06.30.
 14. Секционный рекуператор для промышленных печей: патент № 5378 U Республика Беларусь: МПК (2006) F27B3/00, F27B9/00, F27B13/00 / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, А. П. Ракомсин [и др.]. Опубл. 2009.06.30.
 15. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрюв; под ред. А. Г. Григорьянц. М.: Изд-во МГТУ, 2006. 664 с.
 16. Григорьянц, А. Г. Оборудование для лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрюв; ред. А. Г. Григорьянц. М.: Изд-во МГТУ, 2022. 285 с.
 17. Gross, M. S. Computer Simulation of the Processes of Engineering Materials with Laser Theory and First Applications / M. S. Gross, I. Black, W. H. Mueller // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36, No 7. P. 929–938. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/7/324>.
 18. Абляция тонких пленок молибдена с поверхности прозрачных подложек лазерными импульсами фемтосекундной длительности / А. Е. Гулевич [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2012. С. 339–340.
- Поступила 19.01.2023
Подписана к печати 24.03.2023
Опубликована онлайн 31.07.2023
- REFERENCES
- 1 Zaitsev D. A. (2017) A Generalized Neighborhood for Cellular Automata. *Theoretical Computer Science*, 666, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
 - 2 Goldenberga J., Efronib S. (2001) Using Cellular Automata Modeling of the Emergence of Innovations. *Technological Forecasting & Social Change*, (68), 293–308.
 - 3 Bogdanova E. A., Sherstyankina A. A. (2017) Simulation Modeling as a Decision-Making Tool. *Novaum*, (6), 25–28 (in Russian).
 - 4 Kozlov G. V., Novikov V. U. (2001) A Cluster Model for the Polymer Amorphous State. *Physics-Uspokhi*, 44 (7), 681–724. <https://doi.org/10.1070/ptu2001v044n07abeh000832>.
 - 5 Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Romanyuk V. N. (2004) *Technical Thermodynamics. Part I*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 486 (in Russian).
 - 6 Krutov V. I., Isaev S. I., Kozhinov I. A., Kozlov N. P., Kofanov V. I., Mironov B. M., Nikitin V. N., Petrazhit-skii G. B., Pylaev A. M., Khvostov V. I., Shishov E. V. (1991) *Technical Thermodynamics*. 3rd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 384 (in Russian).
 7. Nesenchuk A. P., Zhmakin N. P. (1974) Thermal Calculations of Flame Furnaces for Heating and Heat Treatment of Metal. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 295 (in Russian).
 8. Glickman B. F. (1986) *Mathematical Models of Pneumohydraulic Systems*. Moscow, Nauka Publ. 368 (in Russian).
 9. Panchenko V. Ya. (ed.) (2009) *Laser Technologies for Material Processing: Modern Problems of Fundamental Research and Applied Development*. Moscow, Fizmatlit Publ. 664 (in Russian).
 10. Arakelyan S. M., Kucherik A. O., Prokoshev V. G., Rau V. G., Sergeev A. G. (2015) *Introduction to Femtosecond Nanophotonics: Fundamental Foundations and Laser Methods for the Controlled Production and Diagnostics of Nanostructured Materials*. Moscow, Logos Publ. 744 (in Russian).
 11. Antipov A. A., Arakelian S. M., Kutrovskaya S. V., Kucherik A. O., Vartanian T. A. (2014) Deposition of Bimetallic Au/Ag Clusters by the Method of Laser Deposition of Nanoparticles From Colloidal Systems. *Optics and Spectroscopy*, 116 (2), 324–327. <https://doi.org/10.1134/S0030400X14020039>.
 12. Shashin V. M. (1990) *Hydromechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola. 384 (in Russian).
 13. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Rakomsin A. P., Gurchenko P. S., Mandel' N. L., Shishkov V. N., Ryzhova T. V., Kabishov S. M., Kovalev S. S., Khlebtsevich V. A. (2010) *Heat Exchanger for Regenerative Heat Recovery of Waste Heat From Industrial Furnaces*: Patent Republic of Belarus No. 13292 (in Russian).
 14. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Rakomsin A. P., Gurchenko P. S., Trusova I. A., Shishkov V. N., Mandel' N. L., Ryzhova T. V., Kabishov S. M., Shidlovskii V. V., Khlebtsevich V. A. (2009) *Sectional Heat Exchanger for Industrial Furnaces*: Patent Republic of Belarus No 5378 (in Russian).
 15. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow, Publishing House Moscow State Technical University. 664 (in Russian).
 16. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2022) *Laser Processing Equipment*. Moscow, Publishing House Moscow State Technical University. 285 (in Russian).
 17. Gross M. S., Black I., Mueller W. H. (2003) Computer Simulation of the Processes of Engineering Materials with Laser Theory and First Applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36 (7), 929–938. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/7/324>.
 18. Gulevich A. E., Kisel' V. E., Kuleshov N. V., Rudenkov A. S. (2012) *Ablation of thin Films of Molybdenum From the Surface of Transparent Substrates by Femtosecond Laser Pulses*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 339–340 (in Russian).
- Received: 19.01.2023
Accepted: 24.03.2023
Published online: 31.07.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-342-354>

УДК 339.92

Факторы развития корпоративного управления в Китае

Докт. экон. наук, проф. С. Ю. Солодовников¹⁾, канд. экон. наук, доц. Ю. В. Мелешко¹⁾, асп. Ц. Сюй¹⁾

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

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

Реферат. Цель работы – развить теорию корпоративного управления китайскими транснациональными корпорациями за счет выявления и содержательной характеристики факторов, влияющих на эти отношения. Методологической основой исследования выступили метод системного и сравнительного анализа, метод концептуализации научных идей, метод качественной и количественной оценки, субъектный подход. В качестве основных факторов, определяющих направления, инструменты и формы развития корпоративного управления в Китае, выделены следующие: усиление экономической взаимозависимости в рамках макрорегионов, в том числе через транснациональные корпорации, при нарастании экономического и геополитического противостояния между макрорегионами; высокие темпы экономического роста страны, требующие расширения транснациональных форм ведения бизнеса с целью стимулирования экспорта и обеспечения доступа к необходимым импортным ресурсам; расширение частного сектора при сохранении государственного контроля над активами в ключевых отраслях и развитие национального фондового рынка; проводимая кредитно-финансовая политика государства, которая обеспечивает для китайских ТНК привилегированный доступ к финансовым ресурсам; изменение конфигурации глобального технологического пространства в пользу Китая, что способствует развитию китайских ТНК в ИКТ-секторе и совершенствованию корпоративного управления на новой технологической основе; ведущая роль коммунистической партии в политической жизни страны, что позволяет китайским ТНК использовать политический капитал для повышения конкурентоспособности; национальные культурные и мировоззренческие особенности, которые способствуют формированию специфической культуры корпоративного управления (гуанси), отличающейся высоким уровнем социального капитала и ориентацией преимущественно на коллективные интересы. Новизна полученных результатов заключается в раскрытии разнообразия факторов и механизма их влияния на корпоративное управление китайских ТНК, высокой степени взаимозависимости внутренних и внешних факторов, а также в изучении экономических, политических и культурных факторов не обособленно, а в единстве их влияния на объект исследования, что позволяет значительно повысить качество экономического анализа развития корпоративного управления в Китае.

Ключевые слова: транснациональные корпорации, корпоративное управление, регионализация, новая глобализация, экономика Китая, индустриализация, цифровизация, политический капитал, социальный капитал, гуанси

Для цитирования: Солодовников, С. Ю. Факторы развития корпоративного управления в Китае / С. Ю. Солодовников, Ю. В. Мелешко, Ц. Сюй // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 342–354. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-342-354>

Factors for the Development of Corporate Management in China

S. Yu. Solodovnikov¹⁾, Yu. V. Meleshko¹⁾, Jing Xu¹⁾

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

Abstract. Purpose of the work is to develop the theory of corporate management of Chinese transnational corporations (TNC) by identifying and substantive characteristics of the factors influencing these relations. The methodological main of research

Адрес для переписки

Солодовников Сергей Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-93-54
solodovnikov@bntu.by

Address for correspondence

Solodovnikov Sergey Y.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-93-54
solodovnikov@bntu.by

are systemic and comparative analysis, the method of conceptualization of scientific ideas, the method of qualitative and quantitative assessment, the subjective approach. The following are identified as the main factors determining the directions, tools and forms of development of corporate management in China: strengthening economic interdependence within macro-regions, including through transnational corporations, with the growth of economic and geopolitical confrontation between macro-regions; high rates of economic growth of the country, requiring the expansion of transnational forms of doing business in order to stimulate exports and provide access to the necessary import resources; expansion of the private sector while maintaining state control over assets in key industries and the development of the national stock market; the ongoing credit and financial policy of the state, which provides Chinese TNCs with privileged access to financial resources; reconfiguration of the global technological space in favor of China, which contributes to the development of Chinese TNCs in the ICT (information and communication technologies) sector and the improvement of corporate management on a new technological basis; the leading role of the Communist Party in the political life of the country, which allows Chinese TNCs to use political capital to increase competitiveness; national cultural and worldview features that contribute to the formation of a specific culture of corporate management (*guangxi*), characterized by a high level of social capital and a focus primarily on collective interests. The novelty of the results obtained lies in the disclosure of a variety of factors and the mechanism of their influence on the corporate management of Chinese TNCs, a high degree of interdependence of internal and external factors, as well as in the study of economic, political and cultural factors not in isolation, but in the unity of their influence on the object of study, which allows significantly improve the quality of economic analysis of the development of corporate management in China.

Keywords: transnational corporations, corporate management, regionalization, new globalization, Chinese economy, industrialization, digitalization, political capital, social capital, *guangxi*

For citation: Solodovnikov S. Y., Meleshko Y. V., Jing Xu (2023) Factors for the Development of Corporate Management in China. *Science and Technique*. 22 (4), 342–354. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-342-354> (in Russian)

Введение

Китай переживает процесс трансформации социально-экономических отношений, связанный с интенсивным экономическим ростом. Одно из проявлений этого процесса – усиление роли корпоративных образований как важных социально-политических и организационно-экономических факторов, влияющих на условия общественного и экономического развития страны. Транснациональные корпорации (ТНК) стали действенным инструментом прорыва Китая на мировые рынки и ответом на вызовы глобализации и регионализации.

Теоретическую основу исследования составляют научные труды, посвященные проблемам международного разделения труда (А. Смита, Д. Рикардо, Э. Хекшера, Б. Олина), глобализации, транснационализации и международного движения капитала (С. Хаймера, Э. Пенроуза, Ч. Киндльбергера, П. Кругмана, Р. Вернона, Дж. Даннинга и др.), в особенности теории интернализации (Р. Баккли, М. Кассона, Дж. Макманус). Благодаря белорусским ученым-экономистам значительное развитие получили теории интернационализации деловой активности (А. В. Данильченко, К. В. Якушенко), внешнеэкономической политики (Е. Л. Давыденко), внешнеэкономических отношений (А. Е. Дайнеко).

Вместе с тем кардинальное изменение современной геэкономической ситуации, проявляющееся в нарастающем санкционном давлении, разрыве традиционных цепочек поставок, ослаблении влияния устоявшихся наднациональных институтов и, как следствие, усиливающейся регионализации, требует обновления теоретических основ международных экономических отношений. Принято считать, что становление и развитие ТНК является одним из главных факторов глобализации, поскольку приводит к усилению экономической взаимозависимости между национальными рынками. Однако по мере роста глобализации все более высокие темпы набирает и регионализация, призванная противостоять глобальной конкурентной борьбе. Следует согласиться, что «в настоящее время экономическая наука переживает радикальное обновление представлений о характере взаимодействия транснационального и национального начала общественно-хозяйственной жизни. <...> Препрежнее убеждение в незыблемости и необратимости процесса глобальной интеграции, в котором транснациональный капитал играл и играет ведущую роль, находится под все возрастающим давлением потока новых данных, которые его опровергают» [1, с. 132]. Кроме того, большинство современных теорий, описывающих закономерности международных экономических отноше-

ний и деятельности ТНК в частности, по-прежнему остаются в строгих рамках либерально-рыночной модели хозяйствования, что ограничивает их применение для анализа корпоративного управления ТНК из стран со смешанной моделью экономики (например, китайских).

Успех китайских ТНК примечателен тем, что он был достигнут за относительно короткий промежуток времени. Немаловажным фактором успеха является уникальная модель корпоративного управления, формирующаяся на предприятиях Китая, которая существенно отличается от образцов, распространенных в США, Западной Европе или Японии. В Китае развитие корпоративного управления шло постепенно, экспериментируя с зарубежными и национальными идеями и методами, чтобы создать свою собственную систему, служащую стремлению страны к экономическому росту и модернизации.

До настоящего времени остаются малоисследованными особенности механизма корпоративного управления транснациональными корпорациями Китая и возможности его применения в Республике Беларусь, что и определяет актуальность, научную и практическую значимость данной работы. Целью работы является развитие теории корпоративного управления китайских ТНК за счет выявления и содержательной характеристики факторов, влияющих на эти отношения.

Основная часть

За последние 20 лет прогресс в области глобальной интеграции между странами посредством многосторонних переговоров, особенно на уровне Всемирной торговой организации, может быть оценен как незначительный. В 2000 г. большая часть торговли являлась внутрорегиональной и осуществлялась в каждой части широкой триады НАФТА, ЕС и Азии [2]. «Окончательным тестом для оценки того, являются ли сами эти многонациональные корпорации глобальными, выступает их фактический уровень проникновения на рынки по всему миру, особенно на рынки широкой «триады» НАФТА, Европейского союза и Азии. Тем не менее данные о деятельности 500 крупнейших многона-

циональных предприятий показывают, что очень немногие из них успешны в глобальном масштабе. Для 320 из 380 фирм, по которым доступны географические данные о продажах, в среднем 80,3 % от общего объема продаж приходится на их домашний регион триады. Это означает, что многие из крупнейших мировых фирм не являются глобальными, а региональными с точки зрения широты и глубины охвата рынка», – утверждают А. Рагман и А. Вербеке [2]. «Из 365 многонациональных предприятий, по которым имеются данные, только девять однозначно являются “глобальными”, причем не менее 20 % их продаж приходится на все три региона, но менее 50 % – на какой-то один регион. Эта картина регионализации, а не глобализации», – приходят к выводу названные выше ученые [3, р. 6].

По данным Fortune Media IP Limited, в 2022 г. «более 60 % крупнейших компаний мира сосредоточены всего в 3 странах» [4]. Речь идет о Китае, США и Японии. С началом же глобальных санкционных войн традиционные международные институты, господствующие со второй половины XX в. (ООН, ЮНКТАД, ВТО, МВФ, Всемирный банк), показали свою несостоятельность. В противовес этому, национальный протекционизм и региональная интеграция набирают темпы. Для обозначения этих процессов в экономической литературе используются термины «новый протекционизм», «новая нормальность международной конкуренции», «новый изоляционизм», «новая глобализация», «глобализированный национализм» и др. [1; 5; 6].

Китай выступает ключевым игроком экономической интеграции в Азиатском регионе. Нарастивая внутрорегиональную торговлю наиболее быстрыми темпами среди азиатских стран-лидеров, Китай уже в начале 2000-х гг. обогнал по этому показателю Японию [7, с. 36]. По результатам 2021 г. Китай стал крупнейшим инвестором в Азиатском регионе, оставив позади США, Японию и Сингапур [8].

С вступлением Китая в ВТО в 2001 г. его экономика стала еще более интегрированной в мировую. Китай является участником 18 зон свободной торговли с более чем 30 странами и регионами [9]. В 2020 г. по объему прямых иностранных инвестиций Китай впервые занял

первое место в мире, составив 20,2 % глобальных потоков [10, с. 8]. В этом же году 28000 китайских внутренних инвесторов создали в общей сложности 45000 предприятий, осуществляющих внешне ПИИ, в 189 странах (регионах) мира с общей суммой активов на конец года 7,9 трлн дол. США [10, с. 8]. 90 % китайских ПИИ приходится на страны с развивающейся экономикой [10, с. 09].

Несмотря на то, что основной объем прямых иностранных инвестиций Китая сосредоточен в Азии, его внешняя экономическая политика выходит далеко за пределы этого региона. «Китай запуском инициативы “Один пояс – один путь” переместил фокус внимания на Запад. Это движение вызвано как экономическими, так и геополитическими интересами. Среди первых ключевой интерес – необходимость выхода на развивающиеся рынки Европы через богатую сырьевыми ресурсами Евразию, среди вторых – балансирование давления со стороны США, которые пытаются ограничить укрепление Китая и рост его влияния в мире. Эти тенденции проявились особенно отчетливо в период президентства Д. Трампа, провозгласившего открытую торговую войну против Пекина» [11, с. 46]. В 2020 г. прямые инвестиции Китая в 63 страны, которые совместно участвуют в реализации проекта “Один пояс – один путь”, достигли 22,54 млрд дол. США, что составляет 14,7 % от общего объема прямых иностранных инвестиций Китая. В рамках названной инициативы всего было создано более 10000 зарубежных предприятий» [10, с. 13].

Следует согласиться с В. Ф. Байневым и его коллегами, что «нынешний Китай не просто подстраивается под глобальные “правила игры”, сформулированные западными странами после Второй мировой войны и охраняемые такими международными институтами, как Всемирный банк, Международный валютный фонд, Всемирная торговая организация и др., но и сам в духе экономического конструктивизма стремится выстроить глобальную экономическую реальность в соответствии со своими интересами» [12, с. 12]. Китайский ученый Чжао Яньмэй обращает внимание на тот факт, что «в настоящее время в западных развитых капиталистических странах преобладает “антиглобалистское” течение мысли, что вызвало

серьезное сопротивление процессу экономической глобализации в сфере торговли, инвестиций, финансов, капитала, информации, политики и культуры» [13]. По его мнению, это «предоставляет Китаю возможности и вызовы для участия в глобальном управлении» [13]. «Под руководством марксистской мысли экономической глобализации и концепции “сообщества с единой судьбой человечества” Китай будет использовать “Один пояс – один путь”. В качестве практической основы для развития цифровой экономики такие меры, как увеличение расходов на глобальную инфраструктуру, изменение глобального управления и двусторонних отношений, оптимизация структуры промышленности и лидерство в глобальной цепочке создания стоимости, в полной мере раскрывают ведущую роль Китая в процессе развития новой глобализации», – описывает перспективы развития Китая в новой системе международных экономических отношений Чжао Яньмэй [13].

Наравне с развитием таможенного сотрудничества, снижением уровня тарифных и нетарифных барьеров, международных финансовых систем (Азиатский банк инфраструктурных инвестиций, Новый банк развития БРИКС, Фонд Шелкового пути), сотрудничества в области образования и науки (Университетский Альянс нового Шёлкового пути, Стратегический союз высших учебных заведений) Китай широко использует ТНК в качестве инструмента экономической интеграции. «В настоящее время влияние многонациональных корпораций моей страны растет день ото дня, выступая в качестве главной движущей силы и пионера экономической глобализации», – пишет Лю Жунжун [14]. Список 100 крупнейших транснациональных компаний Китая 2021 г., опубликованный China United Enterprises, показывает, что их совокупные зарубежные активы составят 9,38 трлн юаней [14]. Китай (включая Тайвань) впервые в 2018 г. обогнал США по количеству компаний из списка Global 500, а в 2020 г., когда COVID закрыл большую часть мира, еще больше усилил свои позиции [4].

На механизм корпоративного управления китайских ТНК в высокой степени оказывает влияние экономическая политика государства, определяющая структуру национальной эконо-

мики, направления развития промышленности и ее интеграцию в глобальную экономику, а также взаимодействие реального и финансового секторов экономики. Ученые объясняют сверхинтенсивный экономический рост Китая последовательно реализуемой уже более полувека политикой индустриализации: «В основе грандиозных успехов, которые продемонстрировала миру в последние десятилетия Китайская Народная Республика, лежит правильный выбор стратегических приоритетов развития страны. Анализ экономической политики современного Китая показывает, что начиная с 1953 г., то есть на протяжении первой–тринадцатой пятилеток подряд, главным приоритетом указанного развития выступала и продолжает выступать целенаправленная, ускоренная индустриализация – планомерный процесс создания крупного машинного производства во всех отраслях и сферах народного хозяйства» [15, с. 356]. С начала индустриализации «ВВП Китая вырос более чем в 400 раз, а объем промышленного производства увеличился более чем в 700 раз» [12, с. 12].

Быстрорастущая китайская экономика ставит новые задачи, связанные, с одной стороны, с ростом потребностей в разнообразных ресурсах, с другой – с необходимостью расширения экспорта производимых товаров и формирования для этого соответствующей инфраструктуры. В список 100 крупнейших в мире нефинансовых ТНК в 2021 г., составленный ЮНКТАД, вошли 12 китайских корпораций, из которых три корпорации заняты в секторе «добыча полезных ископаемых, разработка карьеров и нефть», 1 – в секторе «нефтепереработка и смежные отрасли», 1 – в секторе «химические вещества и сопутствующие товары», 1 – в секторе «электричество, газ и вода» [16]. При этом, однако, как показывают Цзи Линь, Ван Цзе и Ван Лимин, «многонациональные корпорации нашей страны [Китая. – Прим. авторов] имеют полный спектр категорий иностранных инвестиций, включая добычу энергии, потребление продуктов питания, транспорт, финансы, строительство и другие области. К концу 2015 г. китайские транснациональные корпорации в сфере передачи информации / программного обеспечения и информационных услуг, обрабатывающей промышленно-

сти и финансовой отрасли выросли по сравнению с предыдущим годом на 115,2 %, 108,5 % и 52,3 % соответственно» [17]. С целью стимулирования экспорта и обеспечения доступа к необходимым импортным ресурсам Китай активно формирует международную инфраструктуру, включающую развитие транспортных коридоров (например, железная дорога Момбаса – Найроби), логистических центров и компании в сфере ритейла.

Структура собственности компании играет центральную роль в исследованиях корпоративного управления и является фундаментальной для понимания эффективного контроля и управления корпорацией. В основе процессов корпоративизма лежит акционерная форма собственности. Трансформация структуры собственности хозяйственных предприятий в Китае в сторону расширения частного сектора началась еще в конце 80-х гг. XX в. В начале 1990-х гг. Китай запустил свой фондовый рынок, что стало мощным толчком для развития акционерной формы собственности. Большое количество национальных компаний стали публичными корпорациями.

Исходя из различия моделей национальных экономик фондовый рынок в экономике Китая играет иную роль, чем в США. В то время как американские компании сильно зависят от акционерного финансирования, в Китае лишь небольшой процент (около 5 %) от общего объема корпоративного финансирования приходится на акционерный капитал. Китайские корпорации гораздо больше полагаются на банковские кредиты и нераспределенную прибыль. Что касается инвесторов, то в Китае недвижимость, продукты управления капиталом и банковские депозиты составляют большую долю инвестиций населения и только около 7 % инвестируют в акции.

Фондовые рынки, очевидно, оказывают меньшее влияние на экономику Китая, чем США. Это означает, что экономика Китая остается относительно защищенной от разрушительных кризисов на фондовом рынке. Но в то же время китайские компании и само корпоративное управление остаются ограниченными в возможностях финансирования через фондовые рынки.

Особенностью фондового рынка Китая является высокая степень участия государства, выражающаяся как в значительной доле акций государственных предприятий, так и в проводимой активной государственной политике и контроле. Данные Bloomberg указывают, что только одна восьмая из почти 4000 компаний, зарегистрированных в Китае, имеет более чем 20 % государственной собственности, эти компании составляют около 40 % от общей рыночной капитализации и 50 % от общего объема выручки листинговых компаний.

Акции китайских госкомпаний подразделяются на свободно обмениваемые на фондовых рынках и ограниченные к обмену, которые не являются предметом торговли. Такие акции, однако, могут быть использованы вне фондового рынка через схемы согласованной продажи, косвенного владения, свободной или по решению суда передачи или доверительного владения. В течение длительного времени доля акций, удерживаемых от прямого обращения, достигала 2/3 общего объема, что сильно затрудняло рыночную оценку госкомпаний. При этом акции, выпущенные дочерними компаниями, могут обмениваться на фондовом рынке без ограничений, что позволяет Китаю отбиваться от западной критики чрезмерного государственного контроля и, по сути, заменяет приватизацию государственных активов их акционированием или рационализацией портфеля. Также акции, обращающиеся на фондовых рынках КНР, разделены на различные классы в зависимости от их доступности для иностранных игроков: акции класса «А» торгуются в юанях для национальных операторов в Шанхае и Шэньчжэне, акции класса «В» предлагаются иностранным инвесторам в иностранной валюте на тех же условиях, акции класса «Н» имеют оборот на Гонконгской фондовой бирже по отдельным правилам [18, с. 26]. Практику разделения и классификации акций следует рассматривать как государственную политику, направленную, с одной стороны, на поддержание контроля над государственными активами в ключевых отраслях, с другой стороны, на ограничение доступа иностранных и частных китайских компаний к листингу, что позволяет госкомпаниям получать дополнительные ре-

сурсы с финансовых рынков на особых условиях.

Трансформация форм собственности и распространение рыночных отношений в экономике Китая сопровождаются развитием банковско-финансового сектора. Финансовые институты играют также важную роль в становлении и развитии ТНК, поскольку концентрация капитала требует концентрации финансовых ресурсов. Справедливо утверждение, что развитость финансовых институтов в высших уровнях регулирования деятельности корпорации выступает одним из характерных признаков ТНК.

Отличительной особенностью банковско-кредитной политики Китая является ее глубокая интеграция в структурную политику страны. Банковский сектор не действует изолированно, а призван обеспечивать функционирование иных отраслей, в первую очередь промышленности. «Государство мерами стимулирующей денежно-кредитной и бюджетно-налоговой политики предпринимает весьма энергичные усилия для создания китайским промышленным предприятиям исключительно благоприятных макроэкономических условий. Индустриализация на новом ее этапе, как и прежде, является самым главным приоритетом развития Поднебесной» [12, с. 12].

Банковско-кредитная политика также выступает частью инвестиционной политики Китая. С целью расширения сферы использования юаня в азиатском регионе и в мире часть кредитных средств для иностранных займов выделяется исключительно в юанях. «Часто для финансирования проектов Китай выделяет кредитные ресурсы странам с большими запасами минеральных ресурсов. Это займы с низким процентом (1,5–3 %) и на продолжительный срок (до 20 лет) при наличии льготного периода. В нередких случаях, когда возвращать средства становится затруднительно, предлагается схема “инвестиции в обмен на сырье”. Она дает возможность расплачиваться по кредитам поставками природных ресурсов или допуском к месторождениям полезных ископаемых» [19]. Таким образом, проводимая кредитно-финансовая политика обеспечивает для китайских ТНК привилегированный доступ к финансовым ресурсам.

В качестве еще одного фактора, предопределяющего управление китайскими ТНК, выступают научно-технический прогресс и развитие информационных технологий. Китай, выходя на мировой рынок, столкнулся с чрезвычайно высокой конкуренцией. Такие традиционные методы, как, например, экономия за счет масштаба [20], были бы недостаточными, чтобы превзойти уже существующие ТНК. Китай включился в мировую технологическую гонку и продемонстрировал колоссальные успехи.

Цифровая экономика Китая занимает лидирующие позиции в мире: в 2021 г. ее масштаб достиг 45,50 трлн юаней с ростом в годовом исчислении 16,2 % [21, р. 8]. Доля цифровой экономики в ВВП Китая в 2020 г. достигла 38,6 %, в ВРП Пекина и Шанхая – более 50 %, в ВРП провинций Гуандун, Чжэцзян, Цзянсу и Фуцзянь – превысила 40 % [10, с. 030]. С целью обеспечения инфраструктуры цифровой экономики в том же году Китай ввел в эксплуатацию 1425000 базовых станций 5G и построил крупнейшую в мире оптоволоконную сеть и сеть 5G [21, р. 8]. Цифровая экономика Китая тесно интегрирована в структуру национальной экономики и выступает основой модернизации для всех иных отраслей, в первую очередь для промышленности. В 2021 г. в Китае строилось более 2000 проектов «5G + промышленный интернет» [21, р. 8]. Цифровые технологии используются в промышленности Китая для автоматизации оборудования и управленческих процессов, достигаемой за счет сквозного инжиниринга и цифровой вертикальной и горизонтальной интеграции в рамках цепочки создания добавленной стоимости. Благодаря использованию кибер-физических систем новое индустриальное производство (Индустрия 4.0) приобретает свои отличительные характеристики (гибкость, прозрачность, кастомизированность) и становится частью «сетевого интеллектуального мира». Доля предприятий в Китае, осуществляющих сетевое сотрудничество, достигла в 2021 г. 38,8 %, а сервисно-ориентированных предприятий – 29,6 % [21, р. 8]. Учитывая, что цифровая трансформация представляет собой переход к новому хозяйственному укладу, основанному на цифровом производстве, цифровых услугах, цифро-

вых бизнес-моделях в сетевых производственных структурах и отличающемся высокотехнологичностью, наукоемкостью и динамичным обновлением способов создания добавленной стоимости за счет комбинирования информационных и материальных факторов производства, эти цифры свидетельствуют о высоком уровне цифровой трансформации промышленности Китая.

Специфическая экономическая модель Китая, сочетающая в себе централизованное долгосрочное планирование и отдельные элементы рыночных механизмов хозяйствования, оказалась наиболее подходящей для реализации на практике интенсивной цифровизации реального сектора. Организационной особенностью нового индустриального производства являются сетевые формы взаимодействия, сочетающие в себе концентрацию основного производства с широкой децентрализацией вспомогательных производств. На базе открытых цифровых платформ объединяются потребители, предприятия промышленности, поставщики услуг, представители государства, тем самым создавая межфирменную производственную сеть на протяжении всего жизненного цикла продукции. По мере распространения цифровизации на смену вертикально-интегрированным промышленным корпорациям приходят сети, которые в условиях повышенной турбулентности среды и усложнения производственных процессов обеспечивают гибкость и адаптивность промышленного производства. Вместе с тем новое индустриальное производство характеризуется высокой капиталоемкостью в отношении как материального, так и информационного капиталов, что влечет за собой необходимость концентрации ресурсов. Возникающий в рамках либерально-рыночных теорий парадокс сетевого производства (преимуществом цифровых технологий – возможностью децентрализованного производства, автоматически координирующегося за счет цифровых технологий, что в теории должно было бы обеспечить уравнивание возможностей малых, средних и крупных предприятий, – могут воспользоваться, как правило, крупные предприятия, способные аккумулировать необходимые финансовые, кадровые и организационные ресурсы для внедрения таких технологий и цифровой трансформа-

ции) не стал для Китая преградой на пути цифровизации, а благодаря активной структурной и промышленной государственной политике был успешно преодолен.

По результатам 2021 г. в Китае насчитывалось более 150 промышленных интернет-платформ «с национальным влиянием», обслуживающих более 1,6 млн промышленных предприятий [21, р. 8]. Примечательным является как отношение количества действующих в Китае промышленных интернет-платформ к количеству предприятий, которых они объединяют (по аналогии, для Республики Беларусь, количество предприятий промышленности которой в 2021 г. составило 16 тыс. [22, с. 14], достаточным были бы одна-две промышленные интернет-платформы), так и факт нахождения этих платформ под государственным влиянием. Цифровая платформа не только организационно-технологически объединяет автономных субъектов производственной деятельности, но и задает технические стандарты связи и программного обеспечения, формы и возможные области сотрудничества. Фактически владельцы цифровых платформ получают монопольное право предоставлять или ограничивать возможность участия субъектов в производственном процессе. В Китае интернет-платформы являются платформами «с национальным влиянием», что обусловлено двумя аспектами: во-первых, государство способно аккумулировать большое количество необходимых ресурсов для разработки платформы и требуемого программного обеспечения; во-вторых, к владельцу цифровой платформы переходят функции управления и контроля всего процесса создания добавленной стоимости промышленной продукции, таким образом владельцы цифровых платформ становятся крупнейшими игроками рынка, конфигурируя производственные сети, влияя на их структуру и участников, тем самым получают огромную экономическую и политическую силу. Это и определяет необходимость участия государств в деятельности промышленных интернет-платформ.

В качестве институциональной основы для взаимодействия с зарубежными компаниями в технологической сфере Китай разработал инициативу «Цифровой шелковый путь». Она включает в себя ряд программ, таких как «Сделано в Китае 2025», «Интернет плюс», «Произ-

водственная супердержава», «Стратегия больших данных», «Кибер-суверенитет», «Стратегия развития облачных технологий». Стратегической целью упомянутой инициативы выступает усиление экономической и технологической мощи Китая в глобальной экономике. По мнению ряда экспертов, «Цифровой шелковый путь» стал центром инициативы «Один пояс – один путь», поскольку управление потоком данных становится все важнее для изменения геополитического баланса в пользу Китая [23].

Для современных китайских ТНК характерен постепенный переход от накопления зарубежных технологических и производственных навыков к стратегии развития собственных технологий и брендов. «В 2010-е годы он [Китай]. – Прим. авторов] перешел от приобретения топливно-сырьевых активов и компаний для выхода на новые зарубежные рынки с целью расширить экспорт к покупке брендов и технологий, необходимых для перехода к экономике, ориентированной, в первую очередь, на внутреннее потребление. Одновременно Китай из страны, копирующей инновации, постепенно превращается в страну, генерирующую их» [24, с. 111–112]. Три из 12 китайских корпораций, которые вошли в число 100 крупнейших нефинансовых ТНК в мире (Список ЮНКТАД 2021 г.), заняты в сфере новых технологий: Hon Hai Precision Industries – электронные компоненты, Huawei Investment & Holding Co Ltd – коммуникационное оборудование, Tencent Holdings Limited – вычисления и обработка данных [16].

ТНК ввиду своих масштабов, разнородности видов деятельности, разветвленной сложной организационной структуры со множеством схем подчиненности являются крупнейшими потребителями решений в области информационных технологий. ИКТ-услуги позволили повысить эффективность управления сложными корпоративными структурами. Благодаря цифровым технологиям ТНК обеспечивают быструю передачу информации между структурными подразделениями и управляющей компанией, автоматизируют организационные процессы и принятие простейших управленческих решений. Корпоративные информационные системы представляют собой единый комплекс программно-технических и организационных ре-

шений, охватывающий все производственные, технологические, финансовые, хозяйственных и внешнеэкономические процессы и объединяющий все подразделения корпорации в единое информационное пространство.

Более того, современные цифровые технологии предоставляют новые возможности организации транснационального бизнеса. Например, «китайская платформа электронных платежей Alipay, входящая в Alibaba Group, установила прямое присутствие или работает через местных операторов более чем в 40 странах Европы и Азии, включая Пакистан, Бангладеш и Индию» [24, с. 111–112]. Успехи Китая в области цифровых технологий обеспечивают китайским ТНК дополнительные конкурентные преимущества как в части повышения эффективности управления благодаря развитым ИКТ-услугам, так и телекоммуникационной инфраструктуры (оптоволоконные кабели, спутниковая связь, системы позиционирования и наблюдения).

Работа корпорации не сводима к сугубо экономической деятельности. По словам С.С. Бойко, «корпорация является пересечением различных групп интересов и сама выступает в качестве группы интересов. <...> В случае участия корпорации в политическом процессе она становится политической группой интересов» [25, с. 14]. Соглашаясь с названным автором, следует добавить, что корпорация ввиду своих экономических масштабов неизбежно будет участвовать в политической жизни, следовательно, всегда выступает в качестве не только экономического, но и политического субъекта. Необходимость изучения проблемы ТНК в социально-политическом контексте привела к формированию концепции «политического капитала» корпорации. Ученые установили, что целью участия корпорации в политической жизни является получение политической ренты и политического дивиденда.

В зависимости от специфики моделей хозяйствования и различий в основополагающих постулатах экономических школ в научной литературе сложилось несколько подходов к определению места и роли государства в отношениях с корпорациями. Среди ученых США и Западной Европы широко распространено мнение о государстве как о «пассивном органе

власти, который лишь фиксирует и суммирует различные воздействия групп интересов», как об «арбитре» или «брокере» [25, с. 15]. С появлением концепций «компании участия», «социальной ответственности» и прочих распространилась идея о том, что органы правительства, которые не участвуют формально в экономических сделках с корпорацией (например, соседние общины или экологические адвокаты), также могут участвовать в борьбе за определение целей корпорации.

Наиболее яркой отличительной чертой китайских ТНК является тесная связь корпоративного управления с национальным правительством. Отношения между ТНК и государством в Китае можно отнести к отношениям патронажного типа, основывающимся на государственном покровительстве собственников и управляющих. При этом государственный патронаж не ограничен рамками предприятия, а обеспечивает широкий спектр услуг, в том числе социальных. Тесные взаимосвязи с правительством обеспечивают для китайских транснациональных корпораций такие дополнительные преимущества, как: экономия на принятии решений относительно стратегии развития; политическая поддержка при выходе корпорации на новые рынки стран, с которыми у КНР выстроены хорошие отношения; поддержка при выходе на новые рынки со стороны уже закрепившихся на этом рынке китайских предприятий; привилегированный доступ к финансовым ресурсам.

И наконец, система корпоративного управления формируется под влиянием национальной культуры согласно требованиям социума и изменяется в соответствии с его динамикой. «Существенной особенностью отношений корпоративистского толка является то, что они могут устанавливаться не только посредством различного рода официальных, “узаконенных” структур и институтов, но и через отношения неформального, межличностного толка. Этот последний момент особенно важен, поскольку... именно неформальный, “нерегламентированный” корпоративизм во многом предопределял (и предопределяет) как его чисто внешние, так и сущностные характеристики» [26, с. 34]. Социальная и культурная среда влияет на управление и стратегию развития предприятий.

Лэй Сяомиао утверждает, что «только 30 % неудач многонациональных предприятий вызваны политикой, капиталом и технологиями, а остальные 70 % вызваны культурными различиями» [27].

В Китае сформировалась специфическая культура корпоративного управления, получившая название гуанси. Гуанси – это связи, часто индивидуальные, которые обеспечивают или подразумевают обмен услугами [28]. По сути, гуанси представляет собой форму социального капитала для китайских фирм. По сравнению с корейским «инмак» или японским «канкей» китайская «гуанси» гораздо больше ориентирована на семейные узы. Многие предприятия в Китае принадлежат семье и управляются ею, поэтому поведение, ориентированное на семью, является естественным для китайцев [29]. Независимые директора с большей вероятностью будут друзьями председателя, владельцев и руководителей компании. Китайские фирмы могут снизить транзакционные издержки за счет гуанси из-за отсутствия необходимости строгого контроля за действиями другой стороны, а также за счет обеспечения приоритетного доступа к ресурсам, необходимым для получения конкурентного преимущества. Фирмы с прочными внешними связями имеют больше возможностей для получения необходимых ресурсов и повышения конкурентоспособности. Таким образом, эти отношения способствуют устойчивому росту и увеличению доли китайских ТНК на рынке [30].

ВЫВОДЫ

1. В качестве основных факторов развития корпоративного управления в Китае выделены следующие:

– фактор усиления регионализации – формирование «новой глобальной» экономики, для которой характерно усиление экономической взаимозависимости в рамках макрорегионов, в том числе через транснациональные корпорации, при нарастании экономического и геополитического противостояния между макрорегионами;

– экономический фактор – высокие темпы экономического роста страны, обусловленные

приоритетом ускоренной индустриализации и последовательно проводимой сбалансированной структурной политикой, требующие расширения транснациональных форм ведения бизнеса с целью стимулирования экспорта и обеспечения доступа к необходимым импортным ресурсам;

– фактор структуры собственности – расширение частного сектора при сохранении государственного контроля над активами в ключевых отраслях и развитие национального фондового рынка стали мощными стимулами для роста китайских ТНК и совершенствования форм корпоративного управления;

– финансовый фактор – проводимая кредитно-финансовая политика государства, которая глубоко интегрирована в структурную политику, обеспечивает для китайских ТНК привилегированный доступ к финансовым ресурсам;

– технологический фактор – изменение конфигурации глобального технологического пространства в пользу Китая способствует развитию китайских ТНК, занимающихся ИКТ-услугами, и совершенствованию корпоративного управления на новой технологической основе;

– политический фактор – ведущая роль коммунистической партии в политической жизни страны проявляется в корпоративном управлении китайскими ТНК, которые широко используют политический капитал для поддержки при выходе на новые рынки стран, с которыми у КНР выстроены хорошие отношения и (или) где уже закрепились иные китайские предприятия, а также для экономии на принятии решений относительно стратегического развития;

– культурный фактор – национальные культурные и мировоззренческие особенности способствуют формированию специфической культуры корпоративного управления («гуанси»), отличающейся высоким уровнем использования социального капитала, формируемого в рамках семейных и дружественных уз, и ориентацией преимущественно на коллективные интересы.

2. Новизна полученных результатов определяется использованием системного подхода, позволившего раскрыть разнообразие факторов, влияющих на корпоративное управление Китая, показать высокую степень взаимозависимости внутренних факторов корпоративного

управления и условий, в которых функционирует ТНК. Факторы экономического, культурного и политического характера рассмотрены не обособленно, а в единстве их влияния на развитие корпоративного управления, что позволяет значительно повысить качество экономического анализа исследуемых отношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермоленко, А. А. Феномен «глобализованного национализма» в контексте новой экономической реальности / А. А. Ермоленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Экономика. Социология. Менеджмент. 2020. Т. 10, № 1. С. 130–141.
2. Rugman, A. M. The End of Globalization / A. M. Rugman. London: Amacom, 2000. 237 p.
3. Rugman, A. M. A Perspective on Regional and Global Strategies of Multinational Enterprises / A. M. Rugman, A. A. Verbeke // Journal of International Business Studies. 2004. Vol. 35, No 1. P. 3–18. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8400073>.
4. Heimer, B. More Than 60 % of the World's Biggest Companies are Concentrated in Just 3 Countries [Electronic Resource] / B. Heimer, N. Rapp // Fortune. 2022. August 6. Mode of access: <https://fortune.com/2022/08/06/worlds-biggest-companies-global-500-greater-china-united-states-japan/>. Date of access: 02.02.2023.
5. Иноземцев, В. Л. Брестский мир по-китайски. О причинах и последствиях победы США в торговой войне с Китаем [Электронный ресурс] / В. Л. Иноземцев // Газета.Ru. – Режим доступа: https://www.gazeta.ru/column/vladislav_inozemcev/12914516.shtml. Дата доступа: 16.01.2023.
6. Матвеева, Л. Г. Российское импортозамещение в условиях «новой нормальности» / Л. Г. Матвеева, О. А. Чернова // Terra Economicus. 2016. Т. 14, № 2. С. 45–53.
7. Ноздрев, С. В. Азия: процессы региональной экономической интеграции / С. В. Ноздрев // Восточная Азия: факты и аналитика. 2020. № 1. С. 34–46. <https://doi.org/10.24411/2686-7702-2020-10003>.
8. Regional Trends Developing Asia. World Investment Report 2022 [Electronic Resource]. Mode of access: https://unctad.org/system/files/non-official-document/WIR_2022-Regional_trends_developing_Asia_en.pdf. Date of access: 20.01.2023.
9. Ли, П. Перспективы развития международной торговли на фоне экономической интеграции на примере высокотехнологичного производства / П. Ли, В. Ф. Байнев // Материалы форума «Перспективы евразийской экономической интеграции», посвященного 10-летию Евразийской экономической комиссии в рамках 18-го Международного научного семинара «Мировая экономика и бизнес-администрирование»: XX Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике», Республика Беларусь, Минск, 16–17 марта 2022 г. / Белорусский национальный технический университет. Минск: Четыре четверти, 2022. С. 121–122.
- 10.中国企业全球化报告. 2021–2022 // 企业国际化蓝皮. – 国社会科学文献出版社. [Доклад о глобализации китайских предприятий (2021–2022). Social Sciences Academic Press (Китай), 2022. 039 с.
11. Лукин, А. В. Россия и Китай в Большой Евразии / А. В. Лукин // Полис. Политические исследования. 2020. № 5. С. 46–59. <https://doi.org/10.17976/jpps/2020.05.04>.
12. Байнев, В. Ф. Цифровая индустриализация Китая: урок для Беларуси / В. Ф. Байнев, Ч. Бинь, Г. Минсин // Университет – территория опережающего развития: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., посвященный 80-летию ГрГУ им. Янки Купалы / редкол.: Ю. Я. Романовский (гл. ред.) [и др.]. Гродно: ГрГУ, 2020. С. 11–14.
13. 赵艳梅.“逆全球化”思潮与中国引领下的新全球化发展路径 [J]. 长春金融高等专科学校学报. 2020, (1): 82–90. [Чжао Яньмэй. Тенденция «антиглобализма» и пути развития новой глобализации под руководством Китая / Чжао Яньмэй // Журнал Чанчуньского финансового колледжа. 2020. № 1. С. 82–90.]
14. 刘荣荣.新冠肺炎疫情背景下我国跨国公司财务管理的优化策略探讨 // 财务审计. 2022, (17): 122–124. [Лю Жунжун. Обсуждение стратегии оптимизации финансового управления многонациональных компаний в моей стране на фоне новой эпидемии коронарной пневмонии / Лю Жунжун // Финансовый аудит. 2022. №1 7. С. 122–124. <https://doi.org/10.13768/j.cnki.cn11-3793/f.2022.0924>.]
15. Гао, М. Развитие индустриально-промышленного комплекса как главный стратегический приоритет Китая / М. Гао, Л. Сяолин, В. Ф. Байнев // Тенденции экономического развития в XXI веке: материалы II Междунар. науч. конф. / редкол.: А. А. Королёва (гл. ред.) [и др.]. Минск: БГУ, 2020. С. 355–357.
16. Annex Tables of the World Investment Report 2022 [Electronic Resource] // UNCTAD. Mode of access: <https://worldinvestmentreport.unctad.org/annex-tables/>. – Date of access: 02.02.2023.
17. 纪琳, 王杰, 王黎明. 中国跨国公司国际化发展特点、问题与对策. 国际经贸. 2018, (18):150–153. [Цзи Линь, Ван Цзе, Ван Лимин. Характеристики, проблемы и меры противодействия интернационализации развития китайских многонациональных корпораций / Цзи Линь, Ван Цзе, Ван Лимин // Международная экономика и торговля. 2018. №18. С. 150–153.]
18. Mattlin, M. The Chinese Government's New Approach to Ownership and Financial Control of Strategic State-Owned Enterprises [Electronic Resource] / M. Mattlin // BOFIT Discussion Papers. 2007. No 10. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1001617. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1001617>.
19. Казак, И. И. Экономическая интеграция Китая в Центральной Азии / И. И. Казак, М. И. Разумовская // Социально-экономическое пространство хозяйственной практики конца XX – начала XXI века: обещанные и реальные изменения: материалы Всероссийской науч.-

- практ. конф. с междунар. участием / под ред. М. И. Разумовской. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. С. 86–94.
20. Caves, R. E. *Multinational Enterprise and Economic Analysis* / R. E. Caves. Cambridge University Press, Cambridge, 1996. 322 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511619113>.
 21. Report on Foreign Investment in China 2022 / Ministry of Commerce the People's Republic of China. 120 p.
 22. Промышленность Республики Беларусь: статистический буклет. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2022. 44 с.
 23. Kitson, A. China doubles down on its Digital Silk Road [Electronic Resource] / A. Kitson, K. Liew // *Reconnecting Asia*. 2019, 14 November. Mode of access: <https://reconnectingasia.csis.org/analysis/entries/china-doubles-down-its-digital-silk-road>. Date of access: 03.02.2023.
 24. Хейфец, Б. А. Технологическое возвышение Китая: новые вызовы для России / Б. А. Хейфец // *Вопросы экономики*. 2020. № 6. С. 104–120. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2020-6-104-120>.
 25. Бойко, С. С. Политический капитал российской корпорации и его влияние на региональный политический процесс / С. С. Бойко. М., 2005. 23 с.
 26. Перегудов, С. П. Корпорации. Общество. Государство / С. П. Перегудов. М.: Наука, 2003. 350 с.
 27. 雷小苗. 正视文化差异发展文化认同—跨国公司经营中的跨文化管理研究. *商业研究*. 2017, (01):13–18. [Лэй Сяомиао. Столкновение с культурными различиями и развитие культурной идентичности – исследование межкультурного управления в деятельности многонациональных корпораций / Лэй Сяомиао // *Бизнес-исследования*. 2017. № 01. С. 13–18.]
 28. Luo, Y. *Guanxi and Business* / Y. Luo. Singapore: World Scientific, 2007. 459 p. <https://doi.org/10.1142/6256>.
 29. Chen, M.-J. *Inside Chinese BUSiness: A Guide for Managers Worldwide* / M.-J. Chen. Boston: Harvard Business School Press, 2003. 256 p.
 30. Park, S. H. *Guanxi and Organizational Dynamics: Organizational Networking in Chinese Firms* / S. H. Park, Y. Luo // *Strategic Management Journal*. 2001. Vol. 22, No 5. P. 455–477. <https://doi.org/10.1002/smj.167>.
- Поступила 30.05.2023
Подписана в печать 04.07.2023
Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Ermolenko A. A. (2020) The Phenomenon of “Globalized Nationalism” in the Context of the New Economic Reality. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment = Proceedings of the Southwest State University. Series: Economy. Sociology. Management*, 10 (1), 130–141 (in Russian).
2. Rugman A. M. (2000). *The End of Globalization*. London, Amacom. 237 p.
3. Rugman A. M., Verbeke A. A. (2004) Perspective on Regional and Global Strategies of Multinational Enterprises. *Journal of International Business Studies*, 35 (1), 3–18. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8400073>.
4. Heimer B., Rapp N. (2022) More Than 60 % of the World's Biggest Companies are Concentrated in Just 3 Countries. *Fortune*. Available at: <https://fortune.com/2022/08/06/worlds-biggest-companies-global-500-greater-china-united-states-japan/> (accessed 02 February 2023).
5. Inozemcev V. L. (2020). Brest peace in Chinese. On the Causes and Consequences of the US victory in the trade war with China. *Gazeta.Ru*. Available at: https://www.gazeta.ru/column/vladislav_inozemcev/12914516.shtml (accessed 16 January 2023) (in Russian).
6. Matveeva L. G., Chernova O. A. (2016). Russian Import Substitution in the Context of the “New Normal”. *Terra Economicus*, 14 (2), 45–53 (in Russian).
7. Nozdrev S. V. (2020) Asia: Processes of Regional Economic Integration. *Vostochnaya Aziya: Fakty i Analitika = East Asia: Facts and Analytics*, (1), 34–46 (in Russian). <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8400073>.
8. Regional Trends Developing Asia. World Investment Report (2022). Available at: https://unctad.org/system/files/non-official-document/WIR2022-Regional_trends_developing_Asia_en.pdf (accessed 20 January 2023).
9. Li P., Bajnev V. F. (2022) Prospects for the Development of International Trade Against the Background of Economic Integration on the Example of High-Tech Production. Proceedings of the Forum “Prospects for Eurasian Economic Integration”, dedicated to the 10th Anniversary of the Eurasian Economic Commission within the framework of the 18th International Scientific Seminar “World Economy and Business Administration”: 20th International Scientific and Technical Conference “Science for Education, Production, Economics”, Republic of Belarus, Minsk, March 16–17, 2022. Minsk, p. 121–122 (in Russian).
10. Report on the Globalization of Chinese Enterprises (2021–2022). Social Sciences Academic Press (China), 2022. 039 (in Chinese).
11. Lukin A. V. (2020) Russia and China in Greater Eurasia. *Polis. Politicheskie Issledovaniya = Polis. Political Studies*, (5), 46–59. <https://doi.org/10.17976/jpps/2020.05.04> (in Russian).
12. Bajnev V. F., Bin' Ch., Minsin G. (2020) China's Digital Industrialization: a Lesson for Belarus. The University is a Territory of Advanced Development. Collection of Scientific Papers of International Scientific-Practical Conference dedicated to the 80th Anniversary of Yanka Kupala State University of Grodno. Grodno, Yanka Kupala State University of Grodno, 11–14 (in Russian).
13. Chzhao Jan'mjej (2020) The Trend of “Anti-Globalism” and the Ways of Developing a New Globalization under the Leadership of China. *Journal of Changchun College of Finance*, (1), 82–90 (in Chinese).
14. Lju Zhunzhun (2022). Discussing a Strategy to Optimize the Financial Management of Multinational Companies in my Country Against the Backdrop of a New Epidemic of Coronary Pneumonia. *Financial Audit*. (17), 122–124 (in Chinese). <https://doi.org/10.13768/j.cnki.cn11-3793/f.2022.0924>.
15. Gao M., Syaolin' L., Bainev V. F. (2020) The Development of the Industrial Complex as China's Main Strategic Priority. *Economic Development Trends in the 21st Century*.

- ry. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference. Minsk, BSU, 355–357 (in Russian).
16. World Investment Report (2022). *UNCTAD*. Available at: <https://worldinvestmentreport.unctad.org/annex-tables/> (accessed 02 February 2023).
 17. Czi Lin', Van Cze, Van Limin (2018). Characteristics, Problems and Countermeasures of the Internationalization of the Development of Chinese Multinational Corporations. *International Economics and Trade*, (18), 150–153 (in Chinese).
 18. Mattlin M. (2007) The Chinese Government's New Approach to Ownership and Financial Control of Strategic State-Owned Enterprises. *BOFIT Discussion Papers*, (10), Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1001617. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1001617>.
 19. Kazak I. I., Razumovskaja M. I. (2020) Economic Integration of China in Central Asia. Socio-Economic Space of Economic practice of the late XX – Early XXI Century: Promised and Real Changes. Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University. 86–94 (in Russian).
 20. Caves R. E. (2007) *Multinational Enterprise and Economic Analysis*. Cambridge University Press. 322 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511619113>.
 21. Ministry of Commerce the People's Republic of China (2022) *Report on Foreign Investment in China 2022*. 120 p.
 22. *Industry of the Republic of Belarus: Statistical Booklet* (2022). Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus. 44 (in Russian).
 23. Kitson A., Liew K. (2019) China Doubles Down on its Digital Silk Road. *Reconnecting Asia*. Available at: <https://reconnectingasia.csis.org/analysis/entries/china-doubles-down-its-digital-silk-road> (03 February 2023).
 24. Hejfec B. A. (2020) Technological Rise of China: New Challenges for Russia. *Voprosy Ekonomiki*, (6), 104–120. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2020-6-104-120> (in Russian).
 25. Boiko S. S. (2005) *The Political Capital of the Russian Corporation and its Influence on the Regional Political Process*. Moscow. 23 p. (in Russian).
 26. Peregodov S. P. (2003) *Corporations. Society. State*. Moscow, Nauka Publ. 350 p. (in Russian).
 27. Ljej Sjaomiao (2017) Encountering Cultural Differences and the Development of Cultural Identity – A Study of Intercultural Management in Multinational Enterprises. *Business Research*, (01), 13–18 (in Chinese).
 28. Luo Y. (2007) *Guanxi and Business*. Singapore: World Scientific. 459 p. <https://doi.org/10.1142/6256>.
 29. Chen M.-J. (2003) *Inside Chinese Business: A Guide for Managers Worldwide*. Boston: Harvard Business School Press. 256 p.
 30. Park S. H., Luo Y. (2001) Guanxi and Organizational Dynamics: Organizational Networking in Chinese Firms. *Strategic Management Journal*, 22 (5), 455–477. <https://doi.org/10.1002/smj.167>.

Received: 30.05.2023

Accepted: 04.07.2023

Published online: 31.07.2023