

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. 21 / No 1 / 2022

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

- Шелег В. К., Романович А. С., Конопляник И. А.**
Мониторинг поломок резцов исполнительного
органа горного комбайна
по параметрам механических колебаний.
Часть 1. Методика исследований 5
- Вахрушев А. В., Федотов А. Ю., Леконтцев А. Т.**
Моделирование процессов деформирования
и разрушения нанокompозитов Al/Cu 12

Строительство

- Батыновский Э. И., Гуриченко Н. С.,
Корсун А. М.**
Структура, непроницаемость и долговечность
цементного бетона 19
- Khroustalev B. M., Liu Tinguo, Aliakseyeu Yu. H.,
Li Zhongyu, Akieliev V. D., Minchenya V. T.**
Thermodynamic Aspects
of Pavement Engineering
(Хрусталев Б. М., Лю Тингуо, Алексеев Ю. Г.,
Ли Чжуньюй, Акельев В. Д., Минченя В. Т.)
Теплотермодинамические аспекты дорожных
одежд) 28

CONTENTS

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Sheleg V. K., Romanovich A. S., Konoplianiuk I. A.**
Breakage Monitoring of Executive Body Cutters
in Continuous Miner According
to Mechanical Vibration Parameters.
Part 1. Research Methodology. 5
- Vakhrushev A. V., Fedotov A. Yu., Lekontsev A. T.**
Modeling of Deformation and Destruction
Processes of Al/Cu Nanocomposites 12

Civil and Industrial Engineering

- Batyanovskiy E. I., Gurinenko N. S.,
Korsun A. M.**
Structure, Impermeability and Durability
of Cement Concrete 19
- Khroustalev B. M., Liu Tinguo, Aliakseyeu Yu. H.,
Li Zhongyu, Akieliev V. D., Minchenya V. T.**
Thermodynamic Aspects
of Pavement Engineering 28

Молодин В. В., Леонович С. Н. Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктурированной железобетонной конструкцией	36
Prokhorov V. I., Troyanchuk S. V., Razakov M. A. Particularities of Exergy Analysis in Air Conditioning Systems (Прохоров В. И., Троянчук С. В., Разаков М. А.) Особенности эксергетического анализа в системах кондиционирования воздуха)	42
Черноиван В. Н., Черноиван Н. В., Торхова А. В. Предложения по реабилитации эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель	50
Смирнов И. Р. Комплексные добавки к бетону на основе веществ органической и минеральной природы	57

Транспорт

Леонтьев Д. Н., Богомолов В. А., Клименко В. И., Рыжих Л. А., Ломака С. И., Сухомлин А. В., Курипка А. В., Фролов А. А. О торможении колесного транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия	63
---	----

Экономика промышленности

Ивуть Р. Б., Царенкова И. М. Формирование логистического подхода к экономическому развитию дорожного хозяйства Республики Беларусь	73
Манцерова Т. Ф., Нго Ань Туэт Структура и организация регионального кластера возобновляемых источников энергии во Вьетнаме	82

Molodin V. V., Leonovich S. N. Bonding of Recovery Concrete with Corrosion-Destroyed Reinforced Concrete Structure	36
Prokhorov V. I., Troyanchuk S. V., Razakov M. A. Particularities of Exergy Analysis in Air Conditioning Systems	42
Chernoivan V. N., Chernoivan N. V., Torkhova A. V. Proposals for Rehabilitation of Operated Combined Insulated Rolled Roofs	50
Smirnov I. R. Complex Additives for Concrete Based on Substances of Organic and Mineral Nature	57

Transport

Leontiev D. N., Bogomolov V. A., Klymenko V. I., Ryzhyh L. A., Lomaka S. I., Suhomlin A. V., Kuripka A. V., Frolov A. A. About Braking of Wheeled Vehicle Equipped with Automated Brake Control System	63
--	----

Economy in Industry

Ivut R. B., Tsarenkova I. M. Formation of Logistics Approach to Economic Development of Road Sector of the Republic of Belarus	73
Mancerova T. F., Ngo Anh Tuyet Structure and Organization of Regional Renewable Energy Cluster in Vietnam	82

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Белый А. В.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Бисби Л.** (Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),
- Виттманн Ф. Х.** (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация),
- Дидерихс У.** (Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия),
- Дмитриев С. М.** (Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация),
- Згуровский М. З.** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина),
- Кондерс А. Б.** (Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия),
- Косёр-Казберук М.** (Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша),
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Лю Тингуо** (компания «Гаоюань», 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),
- Опеляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязьков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
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 стилистический 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 28.01.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2022

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

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/10.21122/2227-1031-2022-21-1-5-11>

УДК 622.232.054.54-044.952-047.36:621.83.061.1:534.63.087 (045)

Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний

Часть 1. Методика исследований

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾, А. С. Романович²⁾,
канд. техн. наук И. А. Конопляник²⁾

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

²⁾Унитарное производственное предприятие «Нива» Романовича С. Г. (Солигорск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Вибромониторинг – наиболее методически развитый и технически обеспеченный средствами регистрации и обработки полученных данных подход. Однако в источниках научно-технической информации о горной технике он представлен гораздо реже, чем иные методы мониторинга. Один из перспективных путей решения этой проблемы, в частности мониторинга поломок резцов режущих дисков исполнительных органов, – использование параметров собственных колебаний частей редукторов, возникающих при импульсном нагружении, обусловленном такими поломками. Следует отметить, что в технически сложном оборудовании горной отрасли, в частности в горных комбайнах, существует немало источников вибрации, колебания которых накладываются друг на друга. И не всегда можно выделить и идентифицировать с источником требуемый информативный сигнал. С учетом этого в статье приведена методика исследований о возможности мониторинга поломок резцов исполнительного органа на примере горного комбайна «Универсал 600» по параметрам возникающих при поломке резцов собственных колебаний режущих дисков исполнительного органа. Определено место регистрации этих колебаний – рукоятки редуктора, на выходных валах которых размещены режущие диски. Установлена частота таких колебаний, равная ~5 Гц. Обоснована возможность использования в качестве средств дальнейших исследований виброанализатора «АГАТ-М» с датчиками вибрации M/AC102-1A. Рассмотрен вариант размещения датчиков вибрации на невращающихся корпусах редукторов привода исполнительного органа. Разработан алгоритм регистрации параметров вибрации, позволяющий разделить ее источники.

Ключевые слова: алгоритм, вибрация, горный комбайн, мониторинг, поломка резцов, собственные колебания

Для цитирования: Шелег, В. К. Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний. Часть 1: Методика исследований / В. К. Шелег, А. С. Романович, И. А. Конопляник // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 5–11. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-5-11>

Breakage Monitoring of Executive Body Cutters in Continuous Miner According to Mechanical Vibration Parameters

Part 1. Research Methodology

V. K. Sheleg¹⁾, A. S. Romanovich²⁾, I. A. Konoplianiuk²⁾

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

²⁾Unitary Production Enterprise [UPE] “Niva” of Romanovich S. G. (Soligorsk, Republic of Belarus)

Abstract. Vibromonitoring is the most methodologically developed and technically equipped with recording tools and data processing approach. However, in the sources of scientific and technical information about mining it is presented much less than other monitoring methods. One of the promising ways to solve this problem, in particular monitoring the breakage

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleg Valery K.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

of cutting disc cutters of an executive body, is to use parameters of natural oscillations of the parts of gearboxes that occur during impulse loading due to such breakages. It should be noted that in the technically complex equipment of the mining industry, in particular in mining machines, there are many sources of vibration, the vibrations of which are superimposed on each other. And it is not always possible to isolate and identify the required informative signal with the source. With this in mind the paper presents a research methodology on the possibility of monitoring the breakage of the executive body cutters on the example of the continuous miner "Universal 600" according to the parameters of natural vibrations of the executive body cutting discs arising from the breakage of the cutters. The place of registration of these vibrations is determined – the gearbox handles, on the output shafts of which cutting discs are placed. The frequency of such vibrations is set equal to ~5 Hz. The possibility of using the AGAT-M vibration analyzer with M/AC102-1A vibration sensors as a means of further research has been substantiated in the paper. The paper considers an option of placing vibration sensors on non-rotating gear housings of the executive body drive. An algorithm for recording vibration parameters has been developed, which makes it possible to separate its sources.

Keywords: algorithm, vibration, continuous miner, monitoring, cutter breakage, natural vibrations

For citation: Sheleg V. K., Romanovich A. S., Konopliankin I. A. (2022) Breakage Monitoring of Executive Body Cutters in Continuous Miner According to Mechanical Vibration Parameters. Part 1: Research Methodology. *Science and Technique*. 21 (1), 5–11. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-5-11> (in Russian)

Введение

Вибромониторинг приводных систем можно отнести к одному из наиболее интенсивно развивающихся направлений в технике [1–15]. При его реализации используются различные методы обработки зарегистрированного в режиме реального времени сигнала о колебаниях, генерируемых зубчатыми колесами или подшипниками на крышках подшипниковых узлов или корпусных деталях. Вибромониторинг – методически развитое и технически обеспеченное средство регистрации и обработки полученных данных. Однако в источниках научно-технической информации о горной технике он упоминается гораздо реже, чем иные методы мониторинга. Это может быть обусловлено тем фактором, что в наиболее распространенном и технически сложном оборудовании горной отрасли, в частности в горных комбайнах, существует значительное число источников вибрации, колебания которых накладываются друг на друга. И не всегда можно выделить и идентифицировать с источником требуемый информативный сигнал. Кроме того, многие источники вибрации генерируют колебания на близких частотах. К одному из перспективных путей решения таких проблем, в частности в области мониторинга поломок резцов режущих дисков исполнительных органов, можно отнести использование параметров собственных колебаний частей редукторов, возникающих при импульсном нагружении, обусловленном этими поломками.

Цель исследований – возможность мониторинга поломок резцов режущих дисков исполнительного органа горного комбайна по параметрам собственных колебаний, регистри-

руемых на невращающихся частях корпусов редукторов его привода.

Методика исследований

Поломка резца в режущем диске приводит к увеличению, по меньшей мере вдвое, нагруженности следующего за ним на режущем диске резца. Поскольку с породой одновременно взаимодействуют около 30–40 % резцов режущего диска, это может практически не сказываться на нагруженности электродвигателя привода исполнительного органа, но оказывать существенное влияние на ресурс зубчатого редуктора привода режущих дисков и увеличивать неравномерность распределения нагрузки между рукоятями редуктора двухпоточного исполнительного органа горного комбайна. Как следствие – одна из рукоятей редуктора исполнительного органа может оказаться более нагруженной при сохранении общей номинальной мощности электродвигателя. Более того, при поломке нескольких резцов в ряде случаев может произойти поломка зубчатых колес или выход из строя подшипникового узла в кинематической цепи привода вращения режущего диска.

Учитывая существенное увеличение близкой к импульсной нагруженности резца (следующего за поломанным резцом) при его взаимодействии с породой, в исполнительном органе могут возникать механические колебания его компонентов с собственной частотой. Эти колебания накладываются на колебания, генерируемые значительным числом источников, состоящих в основном из зубчатых передач редуктора двухпоточного привода исполнительного органа, схема которого показана на рис. 1. Наиболее значимые по амплитуде зубцовые частоты этих передач приведены в табл. 1.

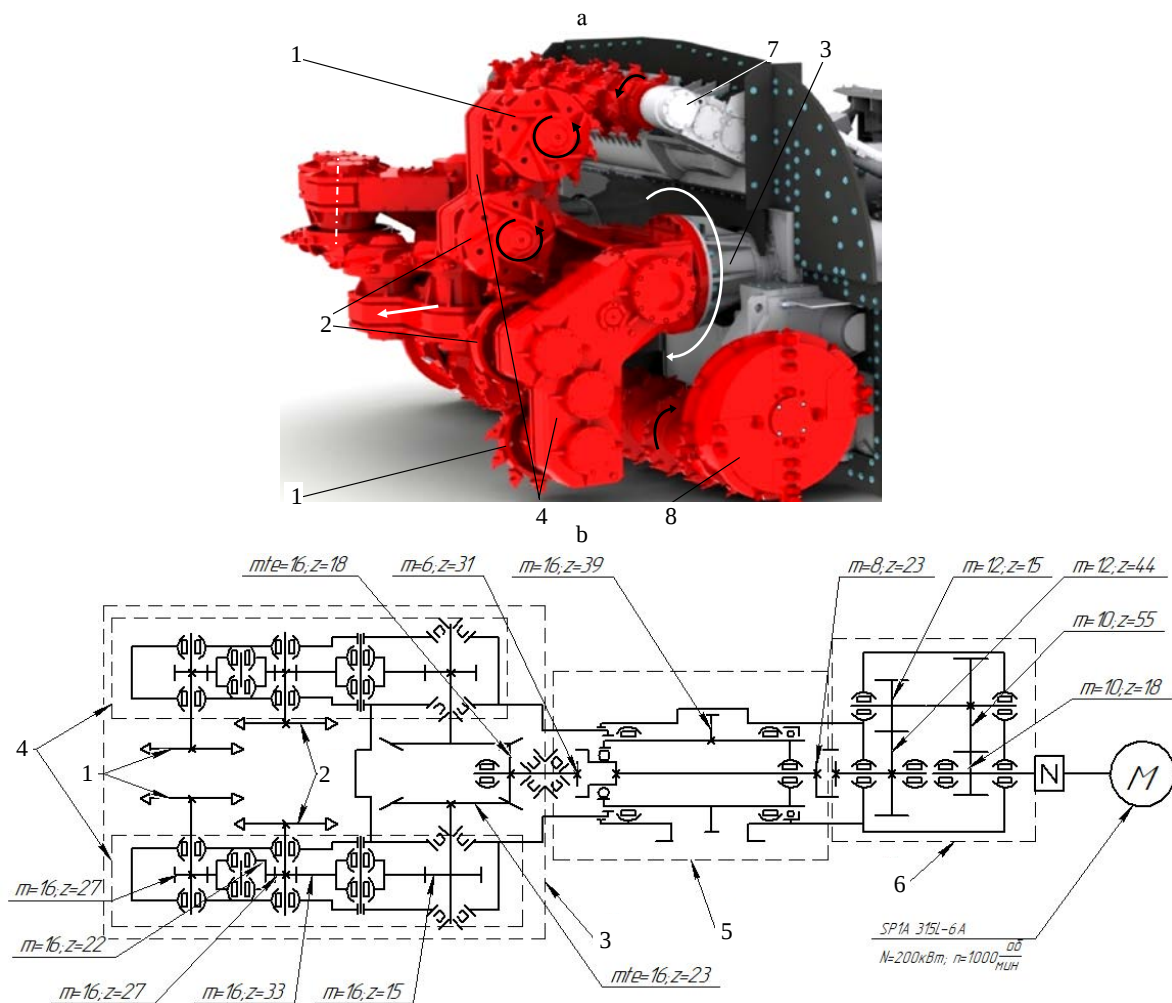


Рис. 1. Общий вид режущих органов горного комбайна «Универсал 600» (а) и кинематическая схема привода исполнительного органа (б): 1, 2 – наружный и внутренний режущие диски; 3 – зубчатый редуктор привода вращения режущих дисков с коническими зубчатыми колесами z18 и z23; 4 – рукоятки зубчатого редуктора привода вращения режущих дисков, в которых размещена цепь прямозубых шестерен z27, z22, z33 и z15; 5 – корпус редуктора привода вращения исполнительного органа с приводной шестерней z39; 6 – корпус входного зубчатого редуктора с z44, z15, z55 и z18; 7 – отбойное устройство; 8 – бермовый орган

Fig. 1. General view of cutting elements of the “Universal 600” continuous miner (a) and drive kinematic diagram of executive body (b): 1, 2 – external and internal cutting discs; 3 – gear reducer of cutting disc rotation drive with bevel gears z18 and z23; 4 – handles of drive gearbox for rotation of cutting discs, in which the chain of spur gears z27, z22, z33 and z15 is placed; 5 – gearbox housing of actuator rotation drive with drive gear z39; 6 – input gearbox housing with z44, z15, z55 and z18; 7 – fender; 8 – berm organ

Таблица 1

Оборотные и зубцовые частоты колебаний, возникающих при работе привода исполнительного органа горного комбайна «Универсал 600»

Revolving and cutter vibration frequencies arising during operation of executive body drive of “Universal 600” continuous miner

Вал трансмиссии	Частота, Гц		
	оборотная	зубцовая	взаимодействия резцов с породой
Зубчатое колесо m16z27, установленное на валу наружного режущего диска 1 редуктора 3	0,8	21,5	9,6
Зубчатое колесо m16z27, установленное на валу внутреннего режущего диска 2 редуктора 3	0,8	21,5	4,8
Коническая шестерня mte16z18 редуктора 3	1,9	33,5	–
Электродвигатель	16,6	–	–

Необходимо отметить, что регистрация колебаний вращающихся компонентов привода режущих дисков в условиях агрессивной, чрезвычайно запыленной внешней среды и повышенных требований к обеспечению взрывобезопасности не совсем тривиальная задача. С учетом этого при мониторинге поломок резцов горного комбайна возникает необходимость решения следующих взаимосвязанных между собой задач:

- выбора той части исполнительного органа, у которой возникают механические колебания с собственной частотой при начальном взаимодействии резцов с породой, и определения значения этой частоты для ее использования при мобильном мониторинге поломок резцов;

- выявления наличия приведенных выше механических колебаний с собственной частотой на невращающихся частях комбайна, оценки возможности их регистрации и выделения из спектра вибрации;

- оценки возможности определения по изменению амплитуды регистрируемых механических колебаний с собственной частотой изменения импульсной нагруженности механической системы, обусловленной ее возрастанием (по меньшей мере вдвое) при начальном взаимодействии с породой следующего за поломаным резца, формирования соответствующих требований к средствам мониторинга.

Таким образом, для осуществления перечисленных выше задач необходимо:

- определить части привода режущих дисков исполнительного органа, у которых возникают собственные механические колебания при импульсном нагружении, обусловленном начальным взаимодействием резцов с породой;

- выделить невращающиеся части привода исполнительного органа, в вибрации которых могут присутствовать частоты приведенных выше механических колебаний с собственной частотой, и оценить ориентировочное влияние на них вибраций, связанных с этими частями зубчатых приводов горного комбайна.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ конструкции исполнительного органа горного комбайна «Универсал 600» показал, что к наиболее рациональной части привода данного органа, у которой могут возникать механические колебания с собственной частотой при импульсном нагружении режущих дисков,

можно отнести достаточно упругоподатливые консольно расположенные рукояти 4 зубчатого редуктора 3 (рис. 1), на выходных валах которого размещены режущие диски. Для определения совпадения частот механических колебаний с собственной частотой рукоятей зубчатого редуктора привода исполнительного органа на крышке подшипникового узла корпуса этого редуктора размещали с магнитной фиксацией пьезоэлектрический датчик М/АС102-1А (рис. 2а). После этого на резце режущего диска импульсным молотком создавалось ударное нагружение. Возникающие при этом колебания фиксировались виброанализатором «АГАТ-М».

Виброанализатор «АГАТ-М», используемый совместно с программным обеспечением «ДИАМАНТ-2», имел частотный диапазон 2–10000 Гц, АЦП 14 бит, количество линий спектра 100, 200, 400 и 800, длину выборки сигналов 256, 512, 1024, 2048, объем памяти 2 Мбит. В его комплект, кроме двух датчиков вибрации М/АС102-1А, входили установочный магнит и импульсный молоток. Важная особенность виброанализатора «АГАТ-М» – это то, что при его исполнении 2ЕхпLПСТ4Х прибор может использоваться во взрывоопасных условиях эксплуатации категорий В-1а, В-1б, В-1г для измерения параметров вибрации.

В результате анализа полученных данных установлено, что частота собственных механических колебаний рукоятей зубчатого редуктора двухпоточного привода исполнительного органа ~5 Гц. При изучении конструктивного исполнения привода исполнительного органа комбайна выделены части этого привода (рис. 1): корпус зубчатого редуктора с коническими зубчатыми колесами z18 и z23, передающими вращение на две рукояти с выходными валами для установки режущих дисков.

Для разделения источников вибрации в качестве базового принимали алгоритм, в котором ее регистрация осуществлялась:

- при вращении только режущих дисков;
- при вращении режущих дисков и исполнительных органов;
- при работе приводов бермового и отбойного органов горного комбайна.

В процессе обработки диагностической информации определяли и анализировали пять основных (наиболее значимых по амплитуде) частот спектра вибрации. При этом выявляли наиболее характерные частоты колебаний, приведенные в табл. 1.

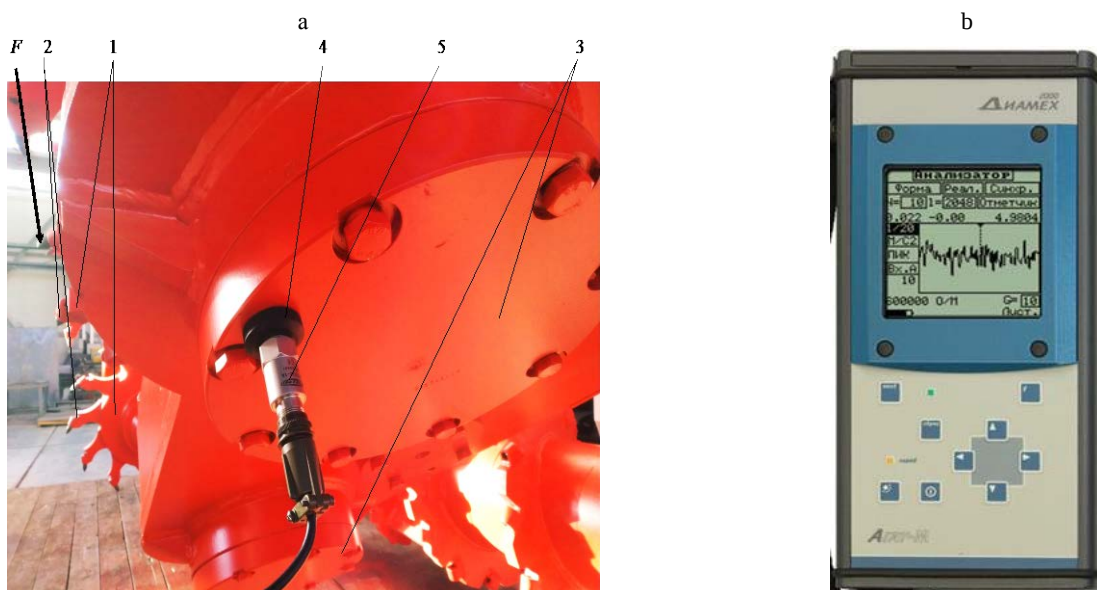


Рис. 2. Место установки датчика вибрации M/AC102-1A на крышке подшипникового узла вала зубчатого редуктора привода вращения режущих дисков (а) и виброанализатор «АГАТ-М» фирмы «Диамех» (б): 1 – режущий диск; 2 – резец; 3 – крышка подшипниковых узлов валов с режущими дисками; 4 – установочный магнит; 5 – датчик вибрации M/AC102-1A; F – импульсная сила

Fig. 2. Mounting location of vibration sensor M/AC102-1A on the cover of bearing unit installed on gear reducer shaft in cutting disc rotation drive (a) and vibration analyzer AGAT-M of “Diamekh” company (b): 1 – cutting disc; 2 – cutter; 3 – cover of bearing shaft units with cutting discs; 4 – adjusting magnet; 5 – vibration sensor M/AC102-1A; F – impulse force

В результате анализа определяли возможность осуществления мониторинга и наиболее рациональное место установки датчика M/AC102-1A с позиций:

- его размещения на невращающихся частях приводов механической системы;
- выделения возникающих при начальном взаимодействии резца режущего диска с импульсным молотком колебаний с частотой 5 Гц из амплитудного спектра;

- формирования требований к аппаратным средствам, позволяющим достоверно определить амплитуду выделяемых колебаний;
- невращающегося относительно основания комбайна корпуса редуктора 5 привода вращения исполнительного органа;
- невращающегося относительно основания комбайна корпуса входного редуктора 6.

Внутренние и внешние источники возникающих колебаний на корпусе зубчатого редуктора (рис. 1) с коническими зубчатыми колесами z18 и z23 показаны на рис. 3.

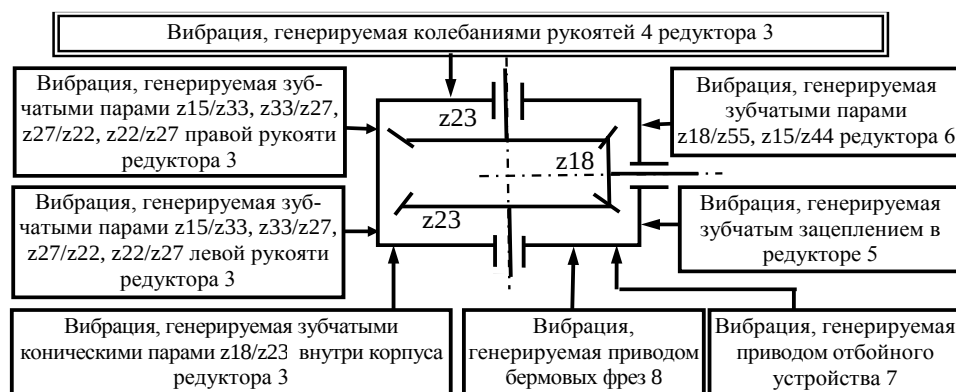


Рис. 3. Источники колебаний, возникающих на корпусе зубчатого редуктора 3 с коническими зубчатыми колесами z18 и z23 привода исполнительного органа горного комбайна

Fig. 3. Sources of vibrations arising on the gearbox housing 3 with bevel gears z18 and z23 of the executive body drive of the continuous miner

С учетом анализа источников колебаний, возникающих на корпусе зубчатого редуктора с коническими зубчатыми колесами $z18$ и $z23$, были установлены датчики вибрации М/АС102-1А (рис. 4), коммутированные с виброанализатором «АГАТ-М», на невращающихся корпусах

редуктора вращения исполнительного органа (рис. 4а) и входного редуктора (рис. 4б). Кроме того, датчики вибрации М/АС102-1А устанавливали также на корпусах редукторов бермовых фрез (рис. 4с) и отбойного устройства (рис. 4д).

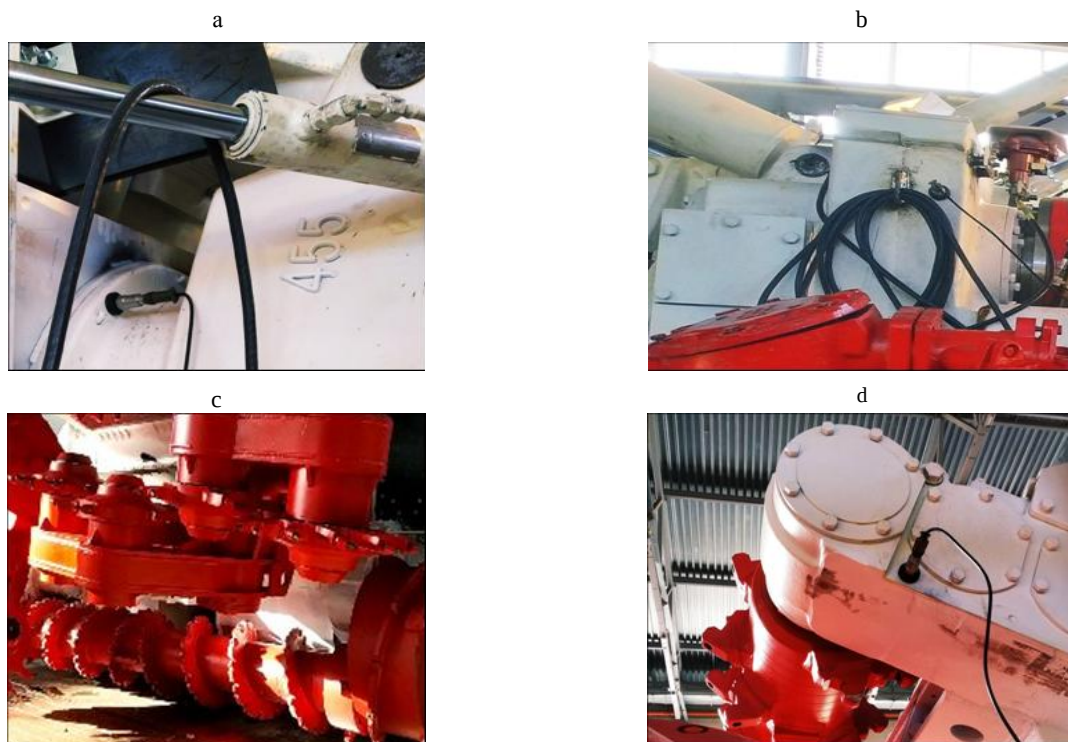


Рис. 4. Места расположения датчиков вибрации М/АС102-1А на корпусах: а – редуктора вращения исполнительного органа; б – входного редуктора; с – редуктора бермовых фрез; д – редуктора отбойного устройства

Fig. 4. Locations of M/AC102-1A vibration sensors on housings: а – gearbox of executive body rotation; б – input gearbox; с – gearbox of berm cutters; д – gearbox of fender

ВЫВОД

На основе анализа результатов исследований определены:

- источник механических колебаний с собственной частотой, возникающих при начальном взаимодействии резца режущего диска с импульсным молотком, в качестве которого определены рукояти исполнительного органа с режущими дисками на выходных валах;

- собственная частота механических колебаний рукоятей исполнительного органа, равная ~ 5 Гц, что позволило обосновать возможность использования в качестве средств дальнейших исследований виброанализатор «АГАТ-М» с датчиками вибрации М/АС102-1А;

- алгоритм работы комбайна при съеме диагностической информации, позволяющий разделить источники вибрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mechanical Vibration Analysis Using an Optical Sensor / F. Claveau [et al.] // Proceedings of 1996 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 1996. Vol. 2. P. 876–879. <https://doi.org/10.1109/CCECE.1996.548292>.
2. Dalpiaz, G. A. Kineto-Elastodynamic Model of a Gear Testing Machine / G. Dalpiaz, A. Rivola, R. Rubini // Proceedings of International Conference on Mechanical Transmissions and Mechanisms, MTM'97. China, Beijing, 1997. P. 549–553.
3. Amabili, M. Dynamic Analysis of Spur Gear Pairs: Steady-State Response and Stability of the SDOF Model with Time-Varying Meshing Damping / M. Amabili, A. Rivola // Mechanical Systems and Signal Processing. 1997. Vol. 3, No 11. P. 375–390. <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0072>.
4. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния машин по вибрации корпуса: пат. Рос. Федерации № 2103668 / В. Н. Костюков, С. Н. Бойченко, А. В. Костюков. Опубл. 27.01.1998.
5. Барков, А. В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова // Сб. труд. Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтоп-

- энерго и Института вибрации США (Vibration Institute, USA). СПб., 1999. Вып. 9.
6. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. гос. морск. тех. ун-та, 2000. 169 с.
 7. Fault Diagnostics Using Statistical Change Detection in the Bispectral Domain / Jr. B. E. Parker [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2000. Vol. 14, No 4. P. 561–570. <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1299>.
 8. Устройство для виброакустической диагностики передач зацеплением: пат. Респ. Беларусь 632 U / Я. В. Басинюк, Н. Н. Ишин, И. Н. Усс, В. Л. Басинюк, Е. И. Мардосевич, Л. М. Антюшеня. Оpubл. 30.09.2002.
 9. Басинюк, Я. В. Вибродиагностика зубчатых передач на основе использования информационных технологий / Я. В. Басинюк // *Современные методы конструирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: сб. науч. тр. / под общ. ред. П. А. Витязя. Минск: Технопринт, 2002. Вып. 1, Т. 2. С. 440–450.*
 10. Dempsey, P. Integrating Oil Debris and Vibration Gear Damage Detection Technologies Using Fuzzy Logic / P. Dempsey, A. Afjeh // *Journal of the American Helicopter Society*. 2004. Vol. 49, No 2. P. 109–116. <https://doi.org/10.4050/JAHS.49.109>.
 11. Ишин, Н. Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач / Н. Н. Ишин. Минск: Беларус. навука, 2013. 432 с.
 12. Технология вибрационного диагностирования подшипников качения колесно-моторных блоков локомотивов [Электронный ресурс] / А. В. Барков [и др.] // Северо-Западный учебный центр. 2014. Режим доступа: <https://vibro-expert.ru/tehnologiya-vibracionnogo-diagnostirovaniya-podshipnikov-kacheniya-kolesno-motornix-blokov-lokomotivov.html>.
 13. Барков, А. В. Возможности стационарных систем вибромониторинга и оперативной вибродиагностики [Электронный ресурс] / А. В. Барков // Северо-Западный учебный центр. 2015. Режим доступа: <https://vibro-expert.ru/vozmojnosti-stacionarnix-sistem-vibromonitoringa-i-operativnoie-vibrodiagnostiki.html>.
 14. Ишин, Н. Н. Теоретические и экспериментальные методы и средства вибрационно-импульсного диагностирования зубчатых передач трансмиссионных узлов мобильных машин / Н. Н. Ишин. Минск, 2015. 52 с.
 15. Диагностика и мониторинг технического состояния на пути к «Индустрии 4.0» / Н. Н. Ишин [и др.] // *Актуальные вопросы машиноведения: сборник научных трудов*. Минск, 2018. Вып. 7. С. 245–250.
 4. Kostyukov V. N., Boychenko S. N., Kostyukov A. V. (1998) *Method for Diagnosing and Predicting Technical State of Machines by Body Vibration*. Patent Russian Federation No 2103668 (in Russian).
 5. Barkov A. V., Barkova N. A. (1999) *Intelligent Systems for Monitoring and Diagnostics of Machines by Vibration*. Sb. Trud. Peterburgskogo Energeticheskogo Instituta Povysheniya Kvalifikatsii Mintopenergo i Instituta Vibratsii SSHA (Vibration Institute, USA) [Collection of Works of Petersburg Power Engineering Institute for Advanced Studies of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation and the Vibration Institute, USA]. St. Petersburg, Iss. 9 (in Russian).
 6. Barkov A. V., Barkova N. A., Azovtsev A. Yu. (2000) *Monitoring and Diagnostics of Rotary Machines by Vibration*. Saint-Petersburg, Publishing House of Saint-Petersburg State Marine Technical University. 169 (in Russian).
 7. Parker Jr. B. E., Ware H. A., Wipf D. P., Tompkins W. R., Clark B. R., Larson E. C., Poor H. V. (2000) Fault Diagnostics Using Statistical Change Detection in the Bispectral Domain. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14 (4), 561–570. <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1299>.
 8. Basinyuk Ya. V., Ishin N. N., Uss I. N., Basinyuk V. L., Mardosevich E. I., Antyushenya L. M. (2002) *Device for Vibroacoustic Diagnostics of Meshed Gears*: Patent of the Republic of Belarus No 632 U (in Russian).
 9. Basinyuk Ya. V. (2002) *Vibration Diagnostics of Gear Transmissions Based on the Use of Information Technologies. Sovremennye Metody Konstruirovaniya Mashin. Raschet, Konstruirovaniye i Tekhnologiya Izgotovleniya: Sb. Nauch. Tr. [Modern Methods of Machine Design. Calculation, Design and Manufacturing Technology: Collection of Scientific Papers]*. Minsk, Tekhnoprint Publ., Iss. 1, Vol. 2, 440–450 (in Russian).
 10. Dempsey P., Afjeh A. (2004) Integrating Oil Debris and Vibration Gear Damage Detection Technologies Using Fuzzy Logic. *Journal of the American Helicopter Society*, 49 (2), 109–116. <https://doi.org/10.4050/JAHS.49.109>.
 11. Ishin N. N. *Dynamics and Vibration Monitoring of Gears*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 432 (in Russian).
 12. Barkov A. V., Barkova N. A., Degterev S. G., Komyskov A. V. (2014) *Technology of Vibration Diagnostics of Rolling Bearings of Wheel-Motor Blocks of Locomotives. Northwestern Training Center*. Available at: <https://vibro-expert.ru/tehnologiya-vibracionnogo-diagnostirovaniya-podshipnikov-kacheniya-kolesno-motornix-blokov-lokomotivov.html>.
 13. Barkov A. V. (2015) *Capabilities of Stationary Systems for Vibration Monitoring and Operational Vibration Diagnostics. Northwestern Training Center*. Available at: <https://vibro-expert.ru/vozmojnosti-stacionarnix-sistem-vibromonitoringa-i-operativnoie-vibrodiagnostiki.html>.
 14. Ishin N. N. (2015) *Theoretical and Experimental Methods and Means of Vibration-Pulse Diagnostics of Gears of Transmission Units of Mobile Machines*. Minsk. 52 (in Russian).
 15. Ishin N. N., Goman A. M., Skorokhodov A. S., Daka-lo Yu. A., Natur'eva M. K. (2018) *Diagnostics and Monitoring of Technical Condition on the Way to "Industry 4.0". Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniya: Sbornik Nauchnykh Trudov [Topical Issues of Mechanical Engineering: a Collection of scientific Papers]*, Minsk, (7), 245–250 (in Russian).

Поступила 02.11.2021

Подписана в печать 10.01.2022

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. Claveau F., Fortier P., Lord S., Gingras D. (1996) *Mechanical Vibration Analysis Using an Optical Sensor. Proceedings of 1996 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2, 876–879. <https://doi.org/10.1109/CCECE.1996.548292>.
2. Dalpiaz G. A., Rivola A., Rubini R. (1997) *Kineto-Elastodynamic Model of a Gear Testing Machine. Proceedings of International Conference on Mechanical Transmissions and Mechanisms, MTM'97*. China, 549–553.
3. Amabili M., Rivola A. (1997) *Dynamic Analysis of Spur Gear Pairs: Steady-State Response and Stability of the SDOF Model with Time-Varying Meshing Damping. Mechanical Systems and Signal Processing*, 3 (11), 375–390. <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0072>.

Received: 02.11.2021

Accepted: 10.01.2022

Published online: 28.01.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-12-18>

УДК 539.215.9

Моделирование процессов деформирования и разрушения нанокompозитов Al/Cu

Докт. физ.-мат. наук, проф. А. В. Вахрушев^{1,2)}, канд. физ.-мат. наук, доц. А. Ю. Федотов^{1,2)}, магистр А. Т. Леконцев¹⁾

¹⁾Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация),

²⁾Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Проведено молекулярно-динамическое моделирование одноосного растяжения охлажденной композиции Al/Cu. При расчетах использовали программный комплекс LAMMPS, включающий в себя классический код молекулярной динамики с акцентом на моделирование материалов. Для визуализации применяли программу Ovito, имеющую большое количество функций, благодаря чему пользователь может тщательно исследовать полученные результаты. При описании межатомного взаимодействия в нанокompозите Al/Cu использовали потенциал погруженного атома ЕАМ. Выбор потенциала обусловлен тем, что он адекватно описывает и воспроизводит свойства широкого класса материалов, в том числе металлов, полупроводников и сплавов. Моделирование осуществлялось в два этапа. На первом образце, состоящий из двух кристаллитов алюминия и меди в форме параллелепипедов, соединенных вдоль одной из сводных границ, размещался в расчетной области и охлаждался при постоянном давлении. Охлаждение осуществлялось для стабилизации наносистемы. На втором этапе, соответствующем деформации, температура и давление менялись в соответствии с протекающими физическими процессами. Для управления температурой и давлением на начальной стадии охлаждения использовали алгоритм термостата и баростата Нозе – Гувера. В статье продемонстрирован характер распределения продольных напряжений по всему объему кристалла в процессе растяжения. При достижении образцом предела упругости наблюдались зарождение дефектов кристаллической решетки и распространение их по кристаллу в виде сдвигов и поворотов атомов в кристаллических плоскостях. Определены области зарождения пластических деформаций. Максимальное разрушение материала происходило по границе раздела. С помощью молекулярно-динамического моделирования динамически исследованы параметры композиции Al/Cu (деформация, температура, механическое напряжение). Проведено сопоставление характеристик образца при деформации. В условиях нагружения в материале реализуется множество процессов, включающих в себя генерацию дефектов, упругую и пластическую деформации, генерацию повреждений и механическое перемешивание.

Ключевые слова: деформация, моделирование, молекулярная динамика, потенциал погруженного атома, дефекты, нанокompозиты, дислокации, механические характеристики, кристаллическая решетка, границы раздела, механическое напряжение, наноструктура

Для цитирования: Вахрушев, А. В. Моделирование процессов деформирования и разрушения нанокompозитов Al/Cu / А. В. Вахрушев, А. Ю. Федотов, А. Т. Леконцев // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 12–18. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-12-18>

Modeling of Deformation and Destruction Processes of Al/Cu Nanocomposites

A. V. Vakhrushev^{1, 2)}, A. Yu. Fedotov^{1, 2)}, A. T. Lekontsev¹⁾

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation),

²⁾Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Izhevsk, Russian Federation)

Abstract. The aim of this work is to carry out molecular dynamics simulation of the uniaxial stretching of a cooled Al/Cu composition. The LAMMPS software package has been used for calculations, which includes the classic molecular dynamics code with an emphasis on modeling materials. The Ovito program has been used for visualization, which has a large number of functions, so that the user can thoroughly investigate the results obtained. When describing the interatomic interaction

Адрес для переписки

Вахрушев Александр Васильевич
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, 7,
426069, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +7 3412 24-45-83
vakhrushev-a@yandex.ru

Address for correspondence

Vakhrushev Alexander V.
Kalashnikov Izhevsk
State Technical University
7, Studencheskaya str.,
426069, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +7 3412 24-45-83
vakhrushev-a@yandex.ru

in the Al/Cu nanocomposite, we used the potential of the embedded EAM atom. The choice of potential is due to the fact that it adequately describes and reproduces the properties of a wide class of materials, including metals, semiconductors and alloys. The simulation has been carried out in two stages. At the first stage, a sample consisting of two crystallites of aluminum and copper in the form of parallelepipeds, connected along one of the joint boundaries, was placed in the computational domain and cooled at constant pressure. Cooling was carried out to stabilize the nanosystem. At the second stage, corresponding to the deformation, the temperature and pressure were changed in accordance with the ongoing physical processes. The algorithm of the thermostat and the Nose – Hoover barostat has been used to control the temperature and pressure at the initial stage of cooling. The paper demonstrates the nature of the distribution of longitudinal stresses over the entire volume of the crystal in the process of stretching. When the sample reached the elastic limit, the nucleation of crystal lattice defects and their distribution over the crystal in the form of shifts and rotations of atoms in crystal planes were observed. Areas of plastic deformation origin have been determined. The maximum destruction of the material occurred along the interface. The parameters of the Al/Cu composition (deformation, temperature, mechanical stress) have been dynamically investigated using molecular dynamics simulation. Comparison of the characteristics of the sample in the deformation process has been carried. Under loading conditions, a variety of processes are implemented in the material, including generation of defects, elastic and plastic deformation, generation of damage, and mechanical mixing.

Keywords: deformation, modeling, molecular dynamics, embedded atom potential, defects, nanocomposites, dislocations, mechanical characteristics, crystal lattice, interfaces, mechanical stress, nanostructure

For citation: Vakhrushev A. V., Fedotov A. Yu., Lekontsev A. T. (2022) Modeling of Deformation and Destruction Processes of Al/Cu Nanocomposites. *Science and Technique*. 21 (1), 12–18. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-12-18> (in Russian)

Введение

Интерес к исследованию поведения композиционных материалов при механическом нагружении продиктован тем, что присущий им комплекс свойств и особенностей сильно отличается их от традиционных конструкционных материалов. Это в первую очередь высокая прочность и низкая плотность исследуемых образцов, а также возможность управления механическими и физическими характеристиками при создании материала.

Однако поверхностное упрочнение в некоторых случаях приводит к снижению прочностных характеристик материала в целом [1, 2]. Это может быть вызвано неоднородным характером развития пластических деформаций. Также поверхности раздела материалов с различными механическими характеристиками являются концентраторами напряжений и могут стать дополнительными источниками дислокаций. Кроме того, представляет интерес вопрос распределения напряжений и деформаций в наноматериалах.

С помощью компьютерного моделирования в настоящее время разрабатываются модели для предсказания свойств и параметров нанокompозита по известным характеристикам его компонентов с целью проектирования наилучшего для определенной цели материала. Также значительный интерес представляют исследование процессов деформирования и разрушения изделий из композиционных материалов и разработка методов функциональной диагностики таких изделий [3].

В [4] методом молекулярной динамики изучен процесс одноосного растяжения с постоян-

ной скоростью вдоль границы раздела образца, состоящего из кристаллитов алюминия и никеля. В результате в полученной системе после достижения на внешних или внутренних границах раздела предела упругости зарождаются дефекты кристаллической решетки и распространяются по кристаллу.

В [5] исследуются влияние микроструктуры материала на его пластическую деформацию и его разрушение при высокоскоростном деформировании, имеющем место, например, в ударно-волновых явлениях [6]. Изучаются механизмы зарождения и роста дислокационных петель в кристалле без дефектов и при наличии плоскостей при деформациях одноосного сжатия и чистого сдвига. Оценены критические напряжения для зарождения дислокационных петель. Исследование механизмов деформации и разрушения проводили на примере алюминия с помощью молекулярно-динамического моделирования. Для описания межатомного взаимодействия в алюминии использовался потенциал погруженного атома (EAM).

В условиях сдвигового нагружения в кристаллических материалах реализуется множество процессов, включающих в себя генерацию дефектов, упругую и пластическую деформации, генерацию повреждений и механическое перемешивание. Экспериментальные исследования подобных явлений, реализуемых на атомном масштабе, сложны и требуют дорогостоящего оборудования. Еще большую сложность вызывают исследования процесса в динамике, т. е. непосредственно во время нагружения. Это приводит к необходимости разработки новых инструментов как экспериментального, так и теоретического изучения,

явно учитывающих особенности исследуемого явления на атомных масштабах [7–9]. Указанные сложности обуславливают значительный интерес развития, в том числе вычислительных методов моделирования для изучения и анализа широкого спектра процессов, протекающих вблизи границ раздела в твердых телах [10–12]. Результаты, полученные в ходе моделирования, позволяют лучше понять механизм изменения кристаллической структуры в условиях внешнего воздействия, что дает возможность целенаправленного воздействия на структуру и состав кристаллических материалов с целью повышения и совершенствования их эксплуатационных характеристик.

В статье методом молекулярной динамики проиллюстрирован процесс одноосного растяжения с постоянной скоростью вдоль границы раздела образца, состоящего из плоских охлажденных кристаллитов (бездефектных монокристаллов) алюминия и меди. Выбор охлажденных нанокомпозитов для дальнейшего изучения процессов деформации обусловлен необходимостью дополнительного исследования таких актуальных материалов, как топологические изоляторы. Грани топологических изоляторов проводят электрический ток практически без сопротивления, несмотря на то что внутренняя часть композита является изолятором [13, 14]. Более ранние исследования были посвящены моделированию механических свойств включений в виде металлических наноструктур сферической формы и нанокомпозитов на их основе [15–19].

Математическая модель и постановка задачи

Для проведения моделирования использовали свободный пакет программ для классической молекулярной динамики LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator), для визуализации полученных результатов – программный комплекс Ovito. В качестве потенциала межатомного взаимодействия был выбран хорошо зарекомендовавший себя метод погруженного атома EAM (Embedded Atom Method). В данном потенциале явно учитывается влияние электронной подсистемы на взаимодействие атомов друг с другом в металлах [20, 21]. Электронная плотность ρ_i в некоторой точке r_i , где находится атом i , записывается в виде отдельных электронных плотностей ρ_{ij} , создаваемых другими атомами j :

$$\rho_i = \sum_{j \neq i}^{N_c} \rho_{ij}(r_{ij}), \quad (1)$$

где N_c – количество атомов, заключенных в сфере обрезания с радиусом r_{cut} ; r_{ij} – расстояние между атомами, $r_{ij} = \sqrt{\sum_{\alpha} (x_{i\alpha} - x_{j\alpha})^2}$.

После усреднения подразумевается, что электронная плотность ρ_{ij} зависит только от расстояния между атомами r_{ij} . Поскольку плотность электронов уменьшается при увеличении расстояния от ядра, для аппроксимации используется следующее выражение:

$$\rho_{ij}(r_{ij}) = \rho_{ij}^0 \exp\left(-\beta\left(\frac{r_{ij}}{r_e} - 1\right)\right), \quad (2)$$

где r_e – равновесное состояние между ближайшими соседними атомами.

Энергия, с которой ионы взаимодействуют с электронной жидкостью, представляется в виде функции $F_i(\rho_i)$, в свою очередь зависящей в основном состоянии от электронной плотности. Ионы притягиваются друг к другу вследствие их взаимодействия с электронной жидкостью, которая находится между ними. Изначально потенциал EAM использовался при описании и моделировании металлов с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК) и объемноцентрированной кубической решеткой. Впоследствии данный потенциал был усовершенствован для металлов с гексагональной плотноупакованной решеткой. Недостаток EAM-потенциала заключается в том, что он не учитывает направление химических связей, возникающих при взаимодействии ядер с π -электронами. Тем не менее в большинстве случаев потенциал дает удовлетворительный результат при воспроизведении различных свойств широкого ряда химических элементов. Потенциальная энергия, действующая на определенный атом в EAM, записывается в следующем виде:

$$V_i = F_i(\rho_i) + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i}^{N_c} \phi(r_{ij}). \quad (3)$$

Отталкивание ионов, происходящее из-за парного кулоновского взаимодействия, характеризуется вторым членом в формуле (3).

Начальные скорости атомов вычисляли исходя из распределения Максвелла, которое случайным образом устанавливает скорости частиц так, чтобы кинетическая энергия системы соответствовала некоторой начальной температуре. При этом средняя скорость всех атомов в направлении каждой оси оставалась нулевой.

Моделирование выполняли в два этапа. На первом образец, состоящий из двух кристаллитов алюминия и меди в форме параллелепипедов, соединенных вдоль одной из сводных границ (рис. 1), размещался в расчетной области и охлаждался при постоянном давлении. Охлаждение осуществляли для стабилизации наносистемы. Выбор охлажденных нанокомпозитов в качестве дальнейшего объекта изучения обусловлен необходимостью дополнительного исследования таких актуальных материалов, как топологические изоляторы. На втором этапе, соответствующем деформации, температура и давление менялись согласно протекающим физическим процессам.

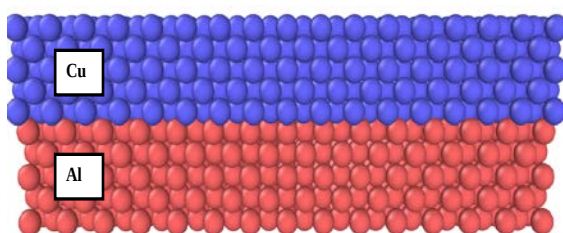


Рис. 1. Изображение образца, состоящего из кристаллитов алюминия и меди

Fig. 1. Image of sample, consisting of aluminum and copper crystallites

Для охлаждения на начальной стадии температура и давление поддерживались на определенном уровне при помощи алгоритмов баростатов и термостатов. Поскольку давление включает в себя кинетическую составляющую из-за скоростей частиц, оба этих алгоритма требуют расчета температуры. Обычно целевая температура и давление указываются пользователем, и термостат и баростат пытаются уравновесить системы с требуемыми температурой и давлением.

В процессе исследований использовали термостат и баростат Нозе – Гувера [6]. В термостате к системе добавляются тепловой резервуар и потери на трение. Сила трения между частицами пропорциональна произведению скорости атома на коэффициент трения ξ . Величина производной ξ по времени определяется через разность между текущей кинетической энергией и значением энергии, соответствующим исходной температуре:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r_i}{dt^2} &= \frac{f_i}{m_i} - \xi \frac{dr_i}{dt}, \quad i = \overline{1, N}; \\ \frac{d\xi}{dt} &= \frac{1}{Q}(T - T_{ext}); \quad Q = \frac{\tau_T^2 T_{ext}}{4\pi^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где Q – коэффициент массы; T – мгновенная температура системы в текущий момент; T_{ext} –

установочная температура термостата; τ_T – период осцилляционных колебаний.

На второй стадии после охлаждения вычисляли такие значения параметров кристалла, как степень деформации, внутренняя энергия, ее кинетическая и потенциальная составляющие. Кроме того, рассматривали распределение внутренней энергии, температуру и напряжение по кристаллу в процессе растяжения, в динамике.

Результаты моделирования

Размеры системы по осям x , y и z равнялись 60, 24 и 24 периодам кристаллической решетки соответственно. Граничные условия использовались периодические. Общее количество атомов после формирования наносистемы приблизительно равнялось 2200. На первом этапе расчетная область охлаждалась до температуры, близкой к 0 К. При охлаждении атомы в наносистеме стабилизировались и занимали позиции, соответствующие минимальной величине энергии. В результате уравнивания системы кристаллическая решетка вблизи границы раздела материалов заметно искажалась, происходил обмен атомами в промежуточном слое. Это связано с несоответствием констант кристаллической решетки, вследствие чего образовывались дислокации, продемонстрированные на рис. 2.

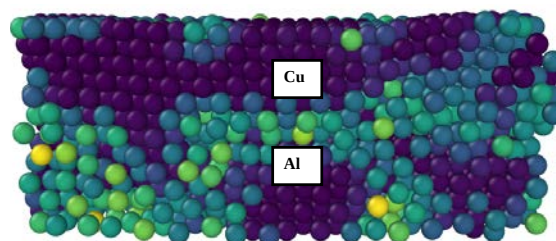


Рис. 2. Изображение образца в процессе уравнивания системы

Fig. 2. Image of sample in the process of system balancing

При растяжении образец сначала деформируется упруго. Затем происходит переход к пластической деформации. Под пластической понимается необратимая деформация, сопровождающаяся структурными изменениями. На рис. 3 пластическая деформация соответствует участку графика по оси абсцисс после значения 0,12. На упругом участке деформации при $\varepsilon < \varepsilon_c$ температура близка к 0 К, а потенциальная энергия возрастает квадратично. При степени деформации $\varepsilon > \varepsilon_c$ температура начинает повышаться, причем ее рост носит рез-

кий очаговый характер вследствие зарождения пластических сдвигов в кристаллической решетке, как показано на рис 4. Наиболее наглядным способом определения пластических сдвигов и разрушения материала является построение поля распределения температуры по кристаллу.

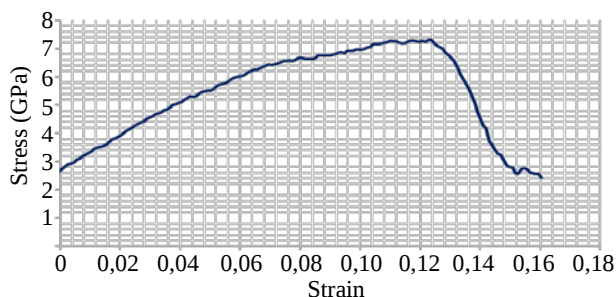


Рис. 3. Зависимость механического напряжения от степени растяжения образца

Fig. 3. Dependence of mechanical stress on the degree of stretching of the sample

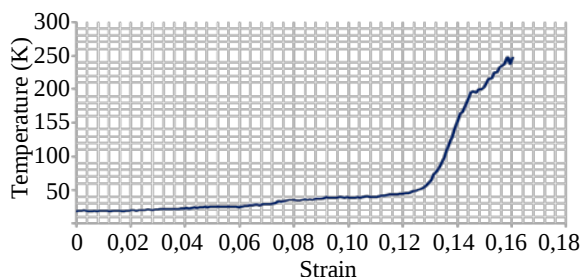


Рис. 4. Зависимость температуры нанокompозита от степени деформации при растяжении

Fig. 4. Dependence of nanocomposite temperature on the degree of deformation in the stretching process

С точки зрения теории упругости задача по растяжению данной композиции описывается уравнениями равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

а также законом Гука:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{1}{E} \sigma_{xx} - \frac{\nu}{E} \sigma_{yy}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{\nu}{E} \sigma_{xx} + \frac{1}{E} \sigma_{yy}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{yy}, \quad (9)$$

где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона.

В процессе деформации колебания узлов кристаллической решетки распространяются таким образом, что в объеме алюминия имеют место значительные повороты атомов, а в объеме меди отчетливо различаются распространяющиеся по кристаллу волны Людерса – Чернова. Данные волны распространяются путем сдвигов в плоскостях $\{111\}$, которые наиболее неустойчивы по отношению к сдвигу в ГЦК-металлах в направлении, близком к направлению максимального касательного напряжения. Пример распределения данных волн проиллюстрирован на рис. 5. Каждый шаг необратимой деформации ведет к резким локальным колебаниям энергии и, соответственно, к локальному повышению температуры [7].

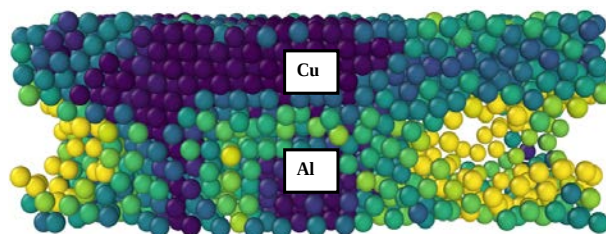


Рис. 5. Расположение дислокаций в момент разрушения слоистого нанокompозита

Fig. 5. Location of dislocations at the time of destruction of layered nanocomposite

При исследовании наиболее удобным и эффективным способом идентификации областей зарождения пластических деформаций является построение графика распределения температуры по образцу в процессе деформирования расчетной ячейки. Моделирование показало, что в областях зарождения дефектов кристаллической решетки температура может превышать среднюю температуру по изучаемому образцу. Исследования распределения температуры в нанокompозите позволили также определить плоскости скольжения при пластических сдвигах. Таким образом, каждый период необратимой деформации ведет к резкому переходу части кинетической энергии в энергию неупорядоченных процессов и, соответственно, к локальному повышению мгновенной температуры.

ВЫВОДЫ

1. Моделирование методом молекулярной динамики позволило на наноуровне изучить поведение композиционных материалов при механическом нагружении, исследовать характер зарождения и развития в них пластической деформации. Использованный многочастичный

межатомный потенциал ЕАМ продемонстрировал хорошее воспроизведение свойств нанокompозита при исследовании процессов деформации.

2. Подготовлены алгоритм и скрипт моделирования для задачи деформации нанокompозита в программном комплексе LAMMPS. Алгоритм позволяет динамически контролировать исследуемые характеристики образца, в том числе величины деформации, термодинамические, энергетические и размерные параметры, напряжения, а также в интерактивном режиме наблюдать за процессами зарождения дислокаций и разрушения образца.

3. Проведено исследование поведения охлажденного нанокompозита Al/Cu при растяжении с постоянной скоростью деформации. В процессе достижения системой предела упругости на внешних или внутренних границах раздела наблюдались зарождение дефектов кристаллической решетки и распространение их по всему кристаллу в виде сдвигов, поворотов атомов в кристаллических плоскостях. При деформировании композиции Al/Cu определены области зарождения пластических деформаций. Максимальное разрушение материала происходит по границе раздела. Характер развития пластической деформации определялся наличием в кристалле плоскостей, сдвиг вдоль которых происходил в направлении максимального касательного напряжения.

4. Результаты проведенных исследований можно использовать для изучения процессов деформации нанокompозиционных материалов с перспективными функциональными свойствами. Кроме того, охлажденные наноструктурированные объекты активно применяются в качестве топологических изоляторов, которые обладают дифференцированными характеристиками проводимости внутри материала и на его поверхности.

Работы выполнены при финансовой поддержке Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (проект 28.04.01 / 18ВАН), гранта УрО РАН № 18-10-1-29 и бюджетного финансирования по проекту 0427-2019-0029.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние геометрии и структуры границы раздела на характер развития пластической деформации на мезомасштабном уровне борированных образцов конструкционных сталей / С. В. Панин [и др.] // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3, № 2. С. 99–115.
2. Физическая мезомеханика и молекулярно-динамическое моделирование / И. Ф. Головнев [и др.] // Физическая мезомеханика. 1998. № 2. С. 21–33.
3. Скворцов, Ю. В. Механика композиционных материалов / Ю. В. Скворцов. Самара: СГАУ, 2013. 94 с.
4. Hoover, W. Canonical Dynamics: Equilibrium Phase-Space Distributions / W. Hoover // Physical Review A. 1985. Vol. 31, Iss. 3. P. 1695–1697.
5. Болеста, А. В. Молекулярно-динамическое моделирование квазистатического растяжения композиции Al/Ni вдоль границы раздела / А. В. Болеста, И. Ф. Головнев, В. М. Фомин // Физическая мезомеханика. 2002. № 4. С. 15–21.
6. Влияние микроструктуры материала на динамическую пластичность и прочность: молекулярно-динамическое моделирование / П. А. Жилев [и др.] // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9, № 1. С. 104–109.
7. Канель, Г. И. Ударные волны в физике конденсированного состояния / Г. И. Канель, В. Е. Фортон, С. В. Разоренов // УФН. 2007. Т. 177, № 8. С. 809–830.
8. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 478 с.
9. Панин, В. Е. Механизм влияния величины зерна на сопротивление деформированию поликристаллов в концепции структурных уровней деформации твердых тел. Часть I. Необходимость учета мезоскопических структурных уровней деформации при анализе уравнения Холла – Петча / В. Е. Панин, Т. Ф. Елсукова, Ю. В. Гриняев // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6, № 3. С. 63–74.
10. Persson, B. N. J. Elastic Contact between Randomly Rough Surfaces: Comparison of Theory with Numerical Results / B. N. J. Persson, F. Bucher, B. Chiaia // Physical Review B. 2002. Vol. 65, Iss. 18. P. 184106.1–7.
11. Iordanoff, I. First Steps for a Rheological Model for the Solid Third Body / I. Iordanoff, Y. Berthier // Tribology Series. 1999. Vol. 36. P. 551–559.
12. Применение метода динамики частиц для описания высокоскоростного разрушения твердых тел / А. М. Кривцов [и др.] // Математика, механика и информатика 2002: тр. Всерос. конф., посвящ. 10-летию РФФИ. М.: Физматлит, 2002. С. 361–377.
13. Веденеев, С. И. Квантовые осцилляции в трехмерных топологических изоляторах / С. И. Веденеев // Успехи физических наук. 2017. № 187. С. 411–429.
14. Бег, Ф. Идентификация двумерных антиферромагнитных топологических изоляторов класса Z_2 / Ф. Бег, П. Пужоль, Р. Рамазашвили // ЖЭТФ. 2018. Т. 153, вып. 1. С. 108–126.
15. Vakhrushev, A. V. Calculation of the Elastic Parameters of Composite Materials Based on Nanoparticles Using Multilevel Models / A. V. Vakhrushev, A. Y. Fedotov, A. A. Shushkov // Nanostructures, Nanomaterials, and Nanotechnologies to Nanoindustry. New Jersey: Apple Academic Press. 2014. Chapter 4. P. 51–70.
16. Vakhrushev, A. V. Modeling of Processes of Composite Nanoparticle Formation by the Molecular Dynamics Technique. Part 1. Structure of Composite Nanoparticles / A. V. Vakhrushev, A. Y. Fedotov, A. A. Vakhrushev // Nanomechanics Science and Technology. 2011. Vol. 2, Iss. 1. P. 9–38.
17. Vakhrushev, A. V. Modeling of Processes of Composite Nanoparticle Formation by the Molecular Dynamics Technique. Part 2. Probabilistic Laws of Nanoparticle Characteristics / A. V. Vakhrushev, A. Y. Fedotov,

- A. A. Vakhrushev // Nanomechanics Science and Technology. 2011. Vol. 2, Iss. 1. P. 39–54.
18. Исследование механизмов формирования наночастиц металлов, определение механических и структурных характеристик нанообъектов и композиционных материалов на их основе / А. В. Вахрушев [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. 2010. Т. 12, № 4. С. 486–495.
 19. Вахрушев, А. В. Исследование вероятностных законов распределения структурных характеристик наночастиц, моделируемых методом молекулярной динамики / А. В. Вахрушев, А. Ю. Федотов // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2, № 2. С. 14–21.
 20. Daw, M. S. Embedded-Atom Method: Derivation and Application to Impurities, Surfaces, and Other Defects in Metals / M. S. Daw, M. I. Baskes // Physical Review B. 1984. Vol. 29, Iss. 12. P. 6443–6453.
 21. Foiles, S. M. Embedded-Atom Method Function for the Fcc Metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their Alloys / S. M. Foiles, M. I. Baskes, M. S. Daw // Physical Review B. 1986. Vol. 33, Iss. 12. P. 7983–7991.

Поступила 24.12.2019

Подписана в печать 14.01.2021

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. Panin S. V., Koval' A. V., Trusova G. V., Pochivalov Yu. I., Sizova O. V. (2000) Influence of Geometry and Structure of Interface on Nature of Plastic Deformation Development at Mesoscale Level of Borated Structural Steel Samples. *Fizicheskaya Mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 3 (2), 99–115 (in Russian).
2. Golovnev I. F., Golovneva E. I., Konev A. A., Fomin V. M. (1998) Physical Mesomechanics and Molecular Dynamics Modeling. *Fizicheskaya Mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, (2), 21–33 (in Russian).
3. Skvortsov Yu. V. (2013) *Mechanics of Composite Materials*. Samara, Samara State Aerospace University. 94 (in Russian).
4. Hoover W. (1985) Canonical Dynamics: Equilibrium Phase-Space Distributions. *Physical Review A*, 31 (3), 1695–1697. <https://doi.org/10.1103/physreva.31.1695>.
5. Bolesta A. V., Golovnev I. F., Fomin V. M. (2002) Molecular Dynamics Simulation of Quasi-Static Stretching of Al/Ni Composition Along Interface. *Fizicheskaya Mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, (4), 15–21 (in Russian).
6. Zhilyaev P. A., Kuksin A. Yu., Norman G. E., Starikov S. V., Stegailov V. V., Yanilkin A. V. (2010) Influence of Material Microstructure on Dynamic Plasticity and Strength: Molecular-Dynamic Simulations. *Fiziko-Khimicheskaya Kinetika v Gazovoy Dinamike = Physico-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 9 (1), 104–109 (in Russian).
7. Kanel G. I., Fortov V. E., Razoryonov S. V. (2007) Shock Waves in Condensed Matter Physics. *Physics-Uspekhi*, 50 (8), 771–791.
8. Goryacheva I. G. (2001) *Mechanics of Friction Interaction*. Moscow, Nauka Publ. 478 (in Russian).
9. Panin V. E., Elsukova T. F., Grinyaev Yu. V. (2003) Mechanism of Grain Size Influence on Strain Resistance of Polycrystals in Context of Structural Deformation Levels of Solids. Part I. Consideration of Mesoscopic Structural Deformation Levels in Analyzing the Hall – Petch Equation. *Fizicheskaya Mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 6 (3), 63–74 (in Russian).
10. Persson B. N. J., Bucher F., Chiaia B. (2002) Elastic Contact between Randomly Rough Surfaces: Comparison of Theory with Numerical Results. *Physical Review B*, 65 (18), 184106.1–7. <https://doi.org/10.1103/physrevb.65.184106>.
11. Jordanoff I., Berthier Y. (1999) First Steps for a Rheological Model for the Solid Third Body. *Tribology Series*, 36, 551–559. [https://doi.org/10.1016/s0167-8922\(99\)80075-3](https://doi.org/10.1016/s0167-8922(99)80075-3).
12. Krivtsov A. M., Volkovets I. B., Tkachev P. V., Tsaplin V. A. (2002) Application of Particle Dynamics Method for Description of High-Speed Destruction of Solids. *Matematika, Mekhanika i Informatika 2002: tr. Vseros. Konf., Posvyashchennoi 10-Letiyu RFFI* [Mathematics, Mechanics and Informatics 2002: Proceedings of All-Russian Conference, Dedicated to the 10th Anniversary of the RFFI]. Moscow, Fizmatlit Publ., 361–377 (in Russian).
13. Vedeneev S. I. (2017) Quantum Oscillations in Three-Dimensional Topological Insulators. *Physics-Uspekhi*, 60 (4), 385–401. <https://doi.org/10.3367/ufne.2017.01.038053>.
14. Bègue F., Pujol P., Ramazashvili R. (2018) Identification Two-Dimensional Z_2 Antiferromagnetic Topological Insulators. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 153 (1), 108–126. <https://doi.org/10.1134/s1063776118010028>.
15. Vakhrushev A. V., Fedotov A. Y., Shushkov A. A. (2014) Calculation of the Elastic Parameters of Composite Materials Based on Nanoparticles Using Multilevel Models. *Nanostructures, Nanomaterials, and Nanotechnologies to Nanoindustry*. New Jersey, Apple Academic Press, Chapter 4, 51–70. <https://doi.org/10.1201/b16956-15>.
16. Vakhrushev A. V., Fedotov A. Y., Vakhrushev A. A. (2011) Modeling of Processes of Composite Nanoparticle Formation by the Molecular Dynamics Technique. Part 1. Structure of Composite Nanoparticles. *Nanomechanics Science and Technology*, 2 (1), 9–38. <https://doi.org/10.1615/nanomechanicsscitechintj.v2.i1.20>.
17. Vakhrushev A. V., Fedotov A. Y., Vakhrushev A. A. (2011) Modeling of Processes of Composite Nanoparticle Formation by the Molecular Dynamics Technique. Part 2. Probabilistic Laws of Nanoparticle Characteristics. *Nanomechanics Science and Technology*, 2 (1), 39–54. <https://doi.org/10.1615/nanomechanicsscitechintj.v2.i1.30>.
18. Vakhrushev A. V., Fedotov A. Y., Vakhrushev A. A., Shushkov A. A., Shushkov A. V. (2010) Study of Process Formation of Metal Nanoparticles, Determination of Mechanical and Structural Parameters of Nanoobjects and Composites Based on them. *Khimicheskaya Fizika i Mezoskopiya = Chemical Physics and Mesoscopy*, 12 (4), 486–495 (in Russian).
19. Vakhrushev A. V., Fedotov A. Y. (2009) Investigation of Probability Distribution Laws of Structural Properties of Nanoparticles Simulated by Molecular Dynamics Method. *Vychislitel'naya Mekhanika Sploshnykh Sred = Computational Continuum Mechanics*, 2 (2), 14–21 (in Russian).
20. Daw M. S., Baskes M. I. (1984) Embedded-Atom Method: Derivation and Application to Impurities, Surfaces, and Other Defects in Metals. *Physical Review B*, 29 (12), 6443–6453. <https://doi.org/10.1103/physrevb.29.6443>.
21. Foiles S. M., Baskes M. I., Daw M. S. (1986) Embedded-Atom Method Function for the Fcc Metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their Alloys. *Physical Review B*, 33 (12), 7983–7991. <https://doi.org/10.1103/physrevb.33.7983>.

Received: 24.12.2019

Accepted: 14.01.2021

Published online: 28.01.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27>

УДК 666.97; 693.54

Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Батыновский¹⁾, канд. техн. наук Н. С. Гуриненко¹⁾,
магистр А. М. Корсун¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье представлены основные гипотезы морозной деструкции цементного бетона. Рассмотрено влияние циклических изменений температуры и воздействия на бетон статической и динамической (ударной) нагрузок на изменения в структуре и прочности бетона. Приведены результаты сравнительных испытаний морозостойкости бетона, содержащего поризующую добавку и пластификатор, способствующий повышению плотности и непроницаемости его структуры. Экспериментально показано, что введение воздухововлекающих добавок, обладающих дополнительным эффектом гидрофобизации, продуктивно с позиций обеспечения морозостойкости бетонов относительно низких классов (до С30/37), прочностью на сжатие до 50 МПа и водопоглощением по массе более 4,0 %. Морозостойкость бетона большей непроницаемости и прочности целесообразно повышать, наращивая эти показатели, в частности, за счет максимального уменьшения начального водосодержания и качественного уплотнения. Этот вывод экспериментально подтверждают приведенные в статье данные, так как «механизм» морозной деструкции цементного бетона многофакторный, а рост его плотности (непроницаемости) и прочности обеспечивает более высокую способность сопротивляться силовым воздействиям, связанным с многократно повторяющимися знакопеременными деформациями бетона, а также с действием внешних нагрузок, накоплением усталостных явлений, гидродинамики фильтрации жидкости под влиянием изменяющихся температурных полей и проч. С использованием стандартизированных и авторских методик проведена сравнительная оценка морозостойкости бетона, содержащего поризующую (воздухововлекающую) добавку, а также пластифицирующие и минеральную добавки аморфного микрокремнезема, вводимые в бетон с целью увеличения его плотности, непроницаемости и прочности, а на этой основе – повышения морозостойкости. Приведены экспериментальные данные, отражающие взаимосвязь и закономерности снижения морозостойкости бетона, подверженного одновременному воздействию статической (на сжатие – разного уровня от соответствующего показателя прочности бетона) и ударной, сосредоточенно приложенной динамической нагрузок. Подтверждена закономерность взаимосвязи ускоренной морозной деструкции бетона с действием механических нагрузок, вызывающих трещинообразование в его структуре.

Ключевые слова: бетон, добавка, пористость, плотность, непроницаемость, прочность, морозостойкость, долговечность

Для цитирования: Батыновский, Э. И. Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона / Э. И. Батыновский, Н. С. Гуриненко, А. М. Корсун // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 19–27. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27>

Structure, Impermeability and Durability of Cement Concrete

E. I. Batyanovskiy¹⁾, N. S. Gurinenko¹⁾, A. M. Korsun¹⁾

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

Abstract. The paper presents the main hypotheses of frost destruction of cement concrete. The influence of cyclic temperature changes and the effect of static and dynamic (shock) loads on concrete on changes in the structure and strength of concrete

Адрес для переписки

Батыновский 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

is considered. The paper provides results of comparative tests of frost resistance of concrete containing a porous additive and a plasticizer, which contribute to an increase in the density and impermeability of its structure. It has been shown experimentally that the introduction of air-entraining additives with an additional effect of hydrophobization is productive from the standpoint of ensuring frost resistance of concrete of relatively low classes (up to C30/37), compressive strength up to 50 MPa and water absorption by mass more than 4.0 %. It is advisable to increase the frost resistance of concrete with greater impermeability and strength by increasing these indicators, in particular, due to the maximum decrease in the initial water content and high-quality compaction. This conclusion is experimentally confirmed by the data presented in the paper, since the “mechanism” of frost destruction of cement concrete is multifactorial, and the growth of its density (impermeability) and strength provide a higher ability to resist “force” effects associated with repeated alternating deformations of concrete, as well as the action of external loads, accumulation of fatigue phenomena, hydrodynamics of liquid filtration under the influence of changing temperature fields, etc. A comparative assessment of concrete frost resistance has been carried out using standardized and patented techniques containing a porous (air-entraining) additive, as well as plasticizing and mineral additives of amorphous micro-silica, introduced into concrete in order to increase its density, impermeability and strength and on this basis – increasing frost resistance. Experimental data are presented, reflecting the relationship and patterns of decrease in frost resistance of concrete subjected to the simultaneous action of static (for compression – different levels from the corresponding indicator of concrete strength) and shock, concentratedly applied dynamic loads. The regularity of the relationship between the accelerated frost destruction of concrete and the action of mechanical loads that cause cracking in its structure has been confirmed.

Keywords: concrete, additive, porosity, density, impermeability, strength, frost resistance, durability

For citation: Batyanovskiy E. I., Gurinenko N. S., Korsun A. M. (2022) Structure, Impermeability and Durability of Cement Concrete. *Science and Technique*. 21 (1), 19–27. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27> (in Russian)

Введение.

Гипотезы морозной деструкции бетона

В процессе развития теории морозостойкости цементного бетона представлено множество гипотез о причинах и механизме его постепенного разрушения при периодическом замерзании-оттаивании в насыщенном жидкостью состоянии, обобщенно изложенных в [1]. Основным и наиболее простым объяснением разрушения бетона в таких условиях считали давление воды, замерзающей в его порах, что учитывается и в современных гипотезах. Но только это физическое явление не может полностью объяснить процесс разрушения бетона. Накопление результатов исследований с 30-х гг. XX в., когда Ю. А. Нилендер дал научную классификацию пустот и трещин в бетоне, выделив пустоты, образовавшиеся при укладке (каверны, воздушные поры, водные поры), и трещины, возникшие в результате силовых воздействий, и их развитие Н. А. Поповым [2], С. В. Шестоперовым [3], В. В. Стольниковым [4], Г. И. Горчаковым [5] и многими другими исследователями выявили влияние на морозостойкость и долговечность бетона не только абсолютной величины пористости, но и физического характера пор – разобщенные они (замкнутые) или сообщающиеся.

Развитием теории влияния на морозостойкость бетона характера его пористости явилась гипотеза Т. Пауэрса «об интервале пор» [6, 7], на основании которой с целью повышения морозостойкости в бетоне создают искусственную

замкнутую пористость (добавками СНВ, СДО, кремнийорганических жидкостей и современных поризаторов, которые фактически получают на основе этих веществ). Действительно, такие добавки за счет эффекта замкнутой (компрессионной) пористости, эффекта пересечения (уменьшения длины) капилляров, а соответственно уменьшения капиллярного подсоса и способности бетона сорбировать жидкость, а также за счет гидрофобизации стенок пор и капилляров в бетоне веществом этих добавок способны на две-три марки повысить морозостойкость бетона с относительно высокой степенью пористости, особенно низких классов по прочности. Однако механизм морозной деструкции бетона гораздо более сложен.

Обобщая различные гипотезы, можно предположить, что механизм постепенного разрушения структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии, представляет собой комплексное сочетание деструктивных факторов, включая: давление льда при кристаллизации свободной воды; гидродинамические воздействия при ее перемещении (миграции) под влиянием градиента теплоты и влагосодержания (термовлагопроводности); гидростатическое давление защемленной в тупиковых порах и дефектах структуры жидкости; напряжения, возникающие от разницы температурных деформаций составляющих бетона и цементного камня (т. е. на макро- и микроуровне, в зонах контакта как цементного камня с заполнителями, так и между кристаллогидратными

ми новообразованиями в цементном камне); усталостные (постепенно увеличивающиеся) дефекты структуры от многократно повторяющихся знакопеременных деформаций; понижение со временем концентрации растворенных в поровой жидкости продуктов гидролиза цемента – как за счет образования нерастворимых в воде кристаллогидратов (отражение продолжающейся реакции цемента с водой), так и из-за подсоса жидкости развивающимися дефектами структуры в период оттаивания образцов, что увеличивает содержание свободной воды в объеме бетона, и др.

При использовании хлористых солей-антиобледенителей (при эксплуатации дорожных покрытий и мостостроительных конструкций) или испытательных солевых растворов (в процессе испытаний бетона на морозостойкость в 5%-м растворе NaCl) действие указанных факторов на бетон дополняется [8–12]: кристаллизационным давлением накопившейся соли, образовавшейся в результате перенасыщения ее раствора в малых по объемам дефектах структуры цементного камня, а также в зонах его контакта с заполнителями в бетоне и в порах (трещинах) зерен заполнителя; усилением процесса миграции жидкой фазы и ростом влагоемкости бетона; возникающим напряженным состоянием на уровне микроструктуры цементного камня из-за локально проявляющегося эффекта от перепада (градиента) температур, сопровождающего процесс очагового растворения-кристаллизации соли; понижением температуры замерзания раствора соли, в сравнении с водой, что способствует глубокому проникновению жидкой фазы в дефекты структуры все меньшего сечения, углубляет развитие процесса массопереноса соли и усиливает эффект деструкции бетона в целом.

В реальных условиях эксплуатации (например, дорожных покрытий) разрушающее воздействие солей-антиобледенителей не прекращается и при положительной температуре окружающей среды. Попеременное увлажнение-высушивание, изменение температуры (даже в пределах суток) вызывают соответствующие многократно повторяющиеся деформации бетона, побуждают проявление процессов растворения и кристаллизации попавшей в его поры соли с образованием кристаллогидратов, увеличивающихся в объеме, а также эндокринного эффекта, т. е. сопровождается постоянным деструктивным воздействием на бетон. Оно дополняется тем, что бетон разнообразных дорожных покрытий подвергается интенсивному

механическому воздействию: истирающим, сжимающим, изгибающим, ударным нагрузкам различной интенсивности и значений, которые многократно повторяются во времени, приводят к ускоренной морозной деструкции бетона [13]. Успешно сопротивляться такому комплексному химико-физическому воздействию способен только бетон высокой плотности, непроницаемости и прочности.

Материалы для бетона и общая методика исследований

В исследованиях использовали материалы со следующими характеристиками:

- вяжущее вещество – портландцемент марки ПЦ 500 по ГОСТ 10178–85, соответствующий классу CEM I 42,5 N по СТБ EN 197-1–2015;
- крупный заполнитель для бетона – гранитный щебень (Микашевичи) фракций 5–10 и 5–20 мм прочностью (по дробимости) ≥ 110 МПа, насыпной плотностью $\rho_0 \sim 1380$ кг/м³ и 1410 кг/м³, плотностью зерен $\rho_z \sim 2700$ кг/м³, соответствующий требованиям ГОСТ 8267–93; кубовидный щебень фракций 2–4 и 4–6 мм прочностью (по дробимости) ≥ 110 МПа, насыпной плотностью $\rho_0 \sim 1400$ –1420 кг/м³, плотностью зерен $\rho_z \sim 2700$ кг/м³, соответствующий требованиям СТБ 1311–2002;
- мелкий заполнитель – природный (мытый) песок с модулем крупности $M_k \sim 2,6$ –2,8, насыпной плотностью $\rho_0 = 1550$ кг/м³, плотностью зерен $\rho_z \sim 2650$ кг/м³, соответствующий требованиям ГОСТ 8736–93;
- сульфат натрия (Na_2SO_4 ; СН) кристаллизационный по ГОСТ 21458–75 – белое порошкообразное кристаллическое вещество без запаха;
- сульфат алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; СА) по ГОСТ 12966–85 – твердое белое кристаллическое вещество без запаха;
- добавку-гиперпластификатор «Стахемент 2000-М Ж 30» (Ст) – пластифицирующую добавку для бетонных смесей и растворов. По эффективности пластифицирующего действия относится к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112–98 (сертификат соответствия требованиям СТБ 1112 № ВУ/112 03.1.3 ГА 1764). Добавка выпускается по ТУ ВУ 800013176.004–2011 в виде раствора 30%-й концентрации;
- добавку-гиперпластификатор «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 190679156.002–2013) – поликарбоксилатный суперпластификатор, отно-

сится к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112;

- микрокремнезем (МК) – в соответствии с требованиями СТБ EN 197-1–2015 с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; удельная поверхность $S_{уд}^{МК} \geq 3,0 \text{ м}^2/\text{г}$;

- ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) – диоксид кремния осажденный, соответствующий ТУ 2168-002-14344269–2009 «Ковелос 35/05т» с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 98 % по массе; удельная поверхность $S_{уд}^{МК} \geq 350 \text{ м}^2/\text{г}$ (данные фирмы-производителя);

- воду для затворения и последующего твердения бетона, удовлетворяющую требованиям СТБ 1114–98.

Результаты экспериментальной оценки морозостойкости бетона

Морозостойкость «рядового» по прочности бетона. Оценивали (рис. 1) на составах, представленных в табл. 1, при замораживании ($t = 50\text{--}55^\circ\text{C}$) в 5%-м растворе NaCl по ГОСТ 10060–95.

Особенностью эксперимента было сопоставление состава бетона № 1 (цемента – 430 кг, песка – 697 кг, щебня (фракций 5–20 мм) – 1117 кг, подвижность смеси марки П1), включающего пластификатор и воздухововлекающую добавку (табл. 1), и составов № 2 и 3, включающих пластифицирующую добавку без введения воздухововлекающей, при прочих равных условиях – расход твердофазных материалов и консистенция (подвижность) смеси. Основное отличие заключалось в формирующейся структуре бетона – с созданием дополнительной пористости за счет введения воздухововлекающей добавки и без нее. В составах № 4 и 5 с исследовательской целью на 5 и 10 % был снижен расход цемента, взамен ввели равное количество микрокремнезема.

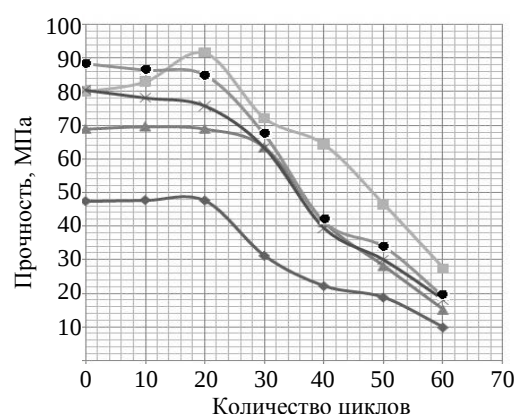


Рис. 1. Результаты испытаний:

—◆— № 1 – контрольный; —■— № 2 – «Реламикс ПК»;
—▲— № 3 – «Стахемент 2000-М»;
—×— № 4 – «Реламикс ПК» + 5 % МК;
—●— № 5 – «Реламикс ПК» + 10 % МК

Fig. 1. Test results: —◆— No 1 – control;

—■— No 2 – Relamix PC;
—▲— No 3 – Stachement 2000-M;
—×— No 4 – Relamix PC + 5 % MSi;
—●— No 5 – Relamix PC + 10 % MSi

На рис. 1 видно снижение прочности бетона (как исходной в начале испытаний, так и после 30 циклов (на $\geq 34\%$)) при введении в состав воздухововлекающей добавки в виде микропорана. Кроме этого, водопоглощение (по массе) бетона с микропораном составило примерно 5 %, а для составов без этой добавки – до 2,0–2,5 %. Следует отметить, что снижение после 30 циклов прочности бетона с поризующей добавкой до ~ 31 МПа означает полную потерю эксплуатационной надежности. Уровень прочности бетона остальных составов в 60–70 МПа способен обеспечивать ее длительный период. Этот вывод подтверждает визуальная оценка состояния структуры бетона испытанных образцов. К 30 циклам испытаний структура бетона с поризующей добавкой (состав № 1) рыхлая, очевидна ее деструкция по всему объему образцов.

Таблица 1

Составы «рядового» бетона
Compositions of “ordinary” concrete

Состав	Цемент, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Щебень, кг/м ³	Вода, кг/м ³	Пласти- фикатор, кг/м ³	Микро- кремнезем, кг/м ³	Микро- поран, кг/м ³	Плотность смеси, кг/м ³
1. Контрольный (микропоран + «Стахемент 2010»)	430,0	697	1117	162	2,15	0	0,301	2423
2. «Реламикс ПК»	430,0	697	1117	120	6,45	0	0	2590
3. «Стахемент 2000-М»	430,0	697	1117	130	4,30	0	0	2515
4. «Реламикс ПК» + 5 % МК	408,5	697	1117	120	6,45	21,5	0	2627
5. «Реламикс ПК» + 10 % МК	387,0	697	1117	140	2,15	43,0	0	2644

Нарушения структуры образцов составов № 2–5 имеются только в поверхностных слоях бетона, т. е. деструкция плотного непроницаемого материала проявляется в частичных нарушениях цементного камня внешнего контура образцов при сохранении исходной (плотной) структуры в объеме бетона после 30, а для состава № 2 – после 50 циклов испытаний.

Кроме отмеченного, очевиден прирост прочности образцов бетона в процессе испытаний состава с высокоэффективным пластификатором «Реламикс ПК». В этом случае начальное водосодержание бетона составляло $(В/Ц)_0 \sim 0,27$, средняя плотность была близка к 2600 кг/м^3 , водопоглощение по массе $\leq 2 \%$, т. е. непроницаемость бетона высока.

Согласно результатам исследований, введение в состав бетона добавки-поризатора едва ли не в два раза (с 80–90 до 45–50 МПа) снизило прочность бетона проектного возраста (28 сут.) при проведении экспериментов с соблюдением правила равноподвижности бетонной смеси и прочих равных условий по режиму твердения бетона.

Также очевидно, что состав бетона с воздухововлекающей добавкой обеспечил расчетный уровень морозостойкости, соответствующий марке F200 и установленным по действующим для бетона дорожного назначения правилам.

Одновременно экспериментальные данные свидетельствуют о том, что бетон без воздухововлекающей добавки, но с использованием эффективного пластификатора (в частности, «Реламикс ПК»), обеспечившего существенный рост плотности, непроницаемости и прочности, только после 50–55 циклов снизил прочность до уровня 40–45 МПа. Можно ожидать, что в эксплуатационных условиях дорожного полотна или иных с воздействием переменного замораживания-оттаивания материал с таким уровнем структурных характеристик и прочности обеспечит существенный рост эксплуатационной надежности и долговечности в сравнении с бетоном, содержащим поризующие добавки.

Морозостойкость бетона, подверженного действию механических нагрузок. Исследования выполняли на двух партиях образцов [13]. Для первой партии циклическое замораживание-оттаивание вели по третьему методу ГОСТ 10060–95 как для дорожного бетона с охлаждением образцов размерами $70 \times 70 \times 70 \text{ мм}$ до минус $(50–55)^\circ\text{C}$ и оттаиванием при $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$ в жидкости. Но вместо 5%-го водного раствора NaCl в емкостях использовали водопроводную воду. На этом этапе исследований исключи-

ли влияние солевого воздействия на бетон. Вторую партию образцов бетона подвергали стандартным испытаниям замораживания-оттаивания по третьему методу ГОСТ 10060–95 при температуре минус $(50–55)^\circ\text{C}$ в 5%-м растворе NaCl.

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали однократным нагружением их после оттаивания (через каждые пять циклов замораживания-оттаивания) под прессом с усилием примерно до 20, 30, 50 и 70 % от прочности бетона в проектном возрасте (28 сут.), а при испытаниях на солестойкость – с такими же периодичностью и усилиями, но после насыщения в растворе соли. Уровень нагрузки для образцов мелкозернистого ($f_{cm,28} \sim 44 \text{ МПа}$) бетона соответствовал 10, 20, 25 и 30 МПа; для образцов бетона со щебнем ($f_{cm,28} \sim 53 \text{ МПа}$) – 15, 25, 30 и 35 МПа.

Динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку на оттаявшие (насыщенные жидкостью) образцы бетона имитировали 10 ударами копра – динамического плотномера (СТБ 1242–2000, масса груза $\sim 2,5 \text{ кг}$, высота падения 300 мм, точка касания – острие конуса с углом при вершине 60°) – по одной из их поверхностей (верхняя грань при последующем определении прочности на сжатие) через каждые пять циклов замораживания-оттаивания (насыщения-высушивания).

На рис. 2, 3 приведены графические зависимости, отражающие выявленную тенденцию изменений прочности бетона на сжатие и построенные (здесь и далее) по средним значениям результатов испытаний серий из трех-шести образцов при коэффициенте вариации прочности $\leq 8 \%$. Следует отметить, что после первых 10–20 циклов замораживания-оттаивания в растворе соли или в воде и до 10 циклов испытаний на солестойкость (циклы насыщения-высушивания в статье не приведены) прочность образцов бетона (до уровня статической нагрузки 10–20 МПа для мелкозернистого бетона и 15–25 МПа для бетона со щебнем) несколько возрастает. Причем это явление имеет место (особенно при глубоком охлаждении) только в бетонах с достаточно высокой плотностью структуры. При циклическом замораживании-оттаивании бетона (например, достигшего проектной прочности и характеризующегося степенью гидратации цемента в 60–70 % при водопоглощении по массе 3–4 %, как в рассматриваемом случае) все же продолжают развиваться (хотя и медленно) реакции гидратации цемента.

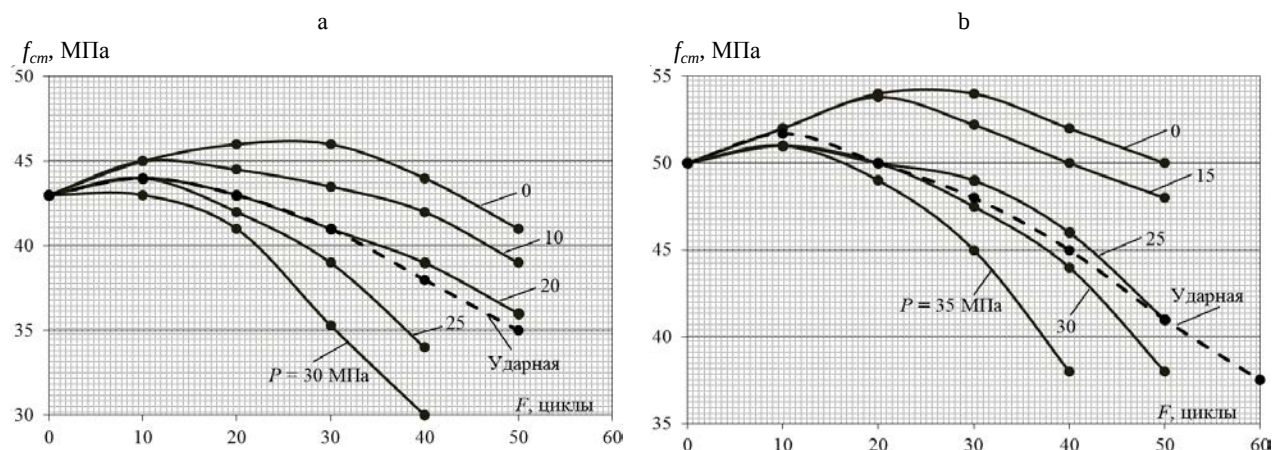


Рис. 2. Тенденция изменения прочности контрольных ($P = 0$) и основных образцов бетона естественного (под пленкой) твердения под воздействием циклического замораживания-оттаивания в среде-воде при $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ и механической нагрузки: а – мелкозернистый бетон; б – бетон со щебнем

Fig. 2. Tendency of changes in the strength of control ($P = 0$) and basic samples of natural concrete (under the film) hardening under the influence of cyclic freezing-thawing in medium-water at $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ and mechanical load: а – fine-grained concrete; б – concrete with crushed stone

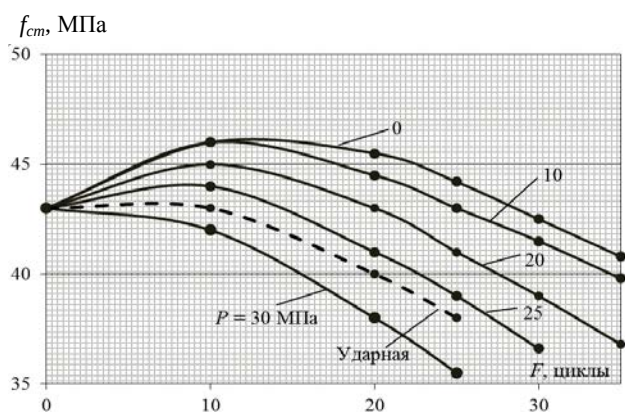


Рис. 3. Тенденция изменения прочности контрольных ($P = 0$) и основных образцов мелкозернистого бетона естественного (под пленкой) твердения под воздействием циклического замораживания-оттаивания в растворе соли при $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ и механической нагрузки

Fig. 3. Tendency of changes in the strength of control ($P = 0$) and main samples of fine-grained concrete of natural (under the film) hardening under the influence of cyclic freezing-thawing in a salt solution at $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ and mechanical load

Одновременно с этим явлением знакопеременные температурные воздействия вызывают деструктивные процессы. В результате на начальном этапе испытаний превалирует эффект побуждения гидратационного процесса, выражающийся в росте прочности бетона. С течением времени начинают преобладать деструктивные явления, которые в рассматриваемых экспериментах усилены за счет механического воздействия периодически прикладываемой к образцам нагрузки. Под ее воздействием возникают напряжения в объеме цементного камня (особенно в зонах контакта его с заполнителями), приводящие к микро-трещинообразованию и снижению прочности бетона. В случае использования при замораживании-оттаивании раствора соли эффект начального роста прочности бетона в процессе испытаний имеет место, но менее значителен и кратковременен, так как на более раннем

этапе проявляется деструктивное воздействие соли.

Сопоставление данных о влиянии на изменение прочности бетона статически приложенной и ударной нагрузок свидетельствует, что отрицательное воздействие динамической ударной нагрузки примерно соответствует (по фактическим данным снижения прочности бетона) уровню статической нагрузки более 60 % (т. е. ее уровню, соответствующему верхней границе трещинообразования бетона [14]). На наш взгляд, это связано с тем, что и в первом, и во втором вариантах воздействия на бетон механическими нагрузками в его структуре появляются микротрещины, развитие которых усугубляется действием знакопеременных температур и деформаций, а также других ранее упоминавшихся факторов при замораживании-оттаивании бетона. При этом точно приложенные динамические нагрузки даже более

опасны (с позиций обеспечения долговечности бетона), чем статические.

Высокопрочный бетон. Эксплуатационные характеристики высокопрочного бетона ($f_{cm,28} \sim (100-110)$ МПа, коэффициент вариации прочности на сжатие $\leq 6\%$) с полифункциональной добавкой – водопоглощение по массе, водонепроницаемость (по воздухопроницаемости), морозостойкость (третий метод испытаний в солевой среде) – определяли по методикам действующих нормативных документов (табл. 2).

Состав бетона с полифункциональной добавкой номинально был одинаков, но при равноподвижной бетонной смеси характеризовался В/Ц = 0,34 долей ед., а также на $\sim 5\%$ большим расходом твердофазных компонентов, так как его средняя плотность была большей ($\rho_{см} \sim 2530$ кг/м³), чем у бетона без добавки ($\rho_{см} \sim 2420$ кг/м³). Водонепроницаемость оценивали по воздухопроницаемости с помощью прибора типа «Агама-2Р» по ГОСТ 12730.5–84 на сериях образцов-кубов (6 шт.) с ребром 150 мм, а морозостойкость – на сериях образцов-кубов с ребром 100 мм.

В процессе испытаний на морозостойкость высокопрочного особо плотного бетона был подтвержден факт достаточно продолжительного по времени (рис. 4) роста прочности образцов под влиянием попеременного замораживания-оттаивания.

Объяснение этому явлению было дано в исследованиях одного из авторов [15] по установленному факту роста прочности образцов особо плотного бетона сухого формования при циклическом замораживании-оттаивании с использованием среды-воды (первый метод по ГОСТ 10060.0–95). Причиной роста прочности бетона является своеобразное разви-

тие (углубление) процесса гидратации цемента в таких условиях, сопровождающееся медленным ростом количества новообразований, дополнительным уплотнением и упрочнением реакционных каемок вокруг непрогидратировавших частиц цемента.

«Механизм» процесса связан с двумя факторами. Во-первых, структура особо плотного высокопрочного бетона к проектному возрасту (к началу стандартных испытаний на морозостойкость) характеризуется наличием тонкодисперсной пористости. А, как известно [16–18], жидкость, заполняющая поры сечением менее 0,1 мкм, находится в адсорбционно-связанном состоянии, т. е. испытывает огромное давление от притяжения к поверхности твердой фазы и при переходе в кристаллическое состояние при очень глубоких отрицательных температурах не увеличивается в объеме, образуя лед плотностью более 1 г/см³. То есть не оказывает давления на стенки ограничивающего ее объем капилляра. Во-вторых, наличествующая в более крупных порах бетона жидкость представляет собой насыщенный продуктами гидролиза-гидратации цемента раствор. При замерзании его в первую очередь замерзает растворитель, т. е. вода. И при этом продукты гидратации «отжимаются» к ограничивающим эти объемы кромкам реакционных каемок прогидратировавшего цемента. Поскольку образующиеся при этом кристаллогидраты не растворимы в воде, они постепенно (с повтором циклов замораживания-оттаивания бетона) увеличивают объем реакционных каемок и площадь их взаимных контактов в цементном камне бетона, что отражается в росте его прочности в процессе циклических испытаний как на морозо-, так и на солестойкость (при насыщении бетона в растворе солей – высушивании).

Таблица 2

Результаты оценки эксплуатационных свойств высокопрочного бетона

Results of evaluating performance properties of high-strength concrete

Характеристика состава бетона	Водопоглощение по массе, %	Водонепроницаемость (по воздухопроницаемости)		Морозостойкость	
		a_i , см ³ /с	Марка	Количество циклов насыщения в 5%-м растворе NaCl (1-й метод)	Марка***
Высокопрочный бетон*	2,4	0,0094	W20	37** (1000)	F1000
Высокопрочный бетон с полифункциональной добавкой*	2,0	0,0066	W20	37** (1000)	F1000

* Состав № 1 – с 1 % пластификатора (Ст) и 10 % традиционного микрокремнезема, состав № 2 – с полифункциональной добавкой 1 % Ст + 0,5 % СН + 0,25 % СА + 1 % УДМК.

** Эксперимент прекращен, но образцы бетона не имеют дефектов и их прочность практически на уровне исходной (т. е. контрольных образцов до начала испытаний).

*** Марка по морозостойкости приведена для бетона общестроительного назначения.

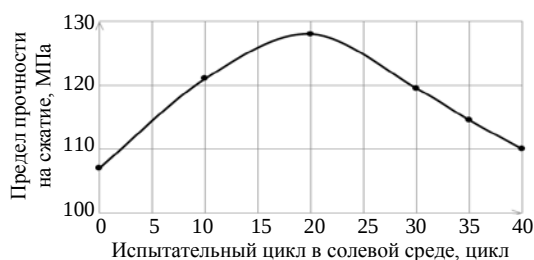


Рис. 4. Изменение прочности на сжатие высокопрочного бетона в процессе испытаний на морозостойкость

Fig. 4. Change in compressive strength of high-strength concrete during frost resistance tests

Одновременно с развитием этого процесса на структуру бетона оказывает влияние совокупность ранее приведенных деструктивных факторов. Превалирование воздействия продолжающейся гидратации цемента отражается в росте прочности бетона (рис. 1–4), а превалирование деструктивных факторов – в ее снижении. Для бетона высокой плотности, непроницаемости и прочности начало и развитие процесса деструкции значительно отодвигаются во времени (рис. 1), что обеспечивает рост эксплуатационной надежности и долговечности строительных конструкций на его основе.

В [15] период роста прочности бетона при испытаниях в среде-воде составил 400–600 циклов замораживания-оттаивания, затем началось медленное снижение прочности, но и через 1000 циклов она превышала начальную на ~6,0 %. В анализируемом случае, несмотря на используемую среду – 5%-й раствор NaCl и замораживание при $t \sim (-55)^\circ\text{C}$, эта тенденция в целом повторяется. Особенно, если соотнести результаты испытаний с таковыми для среды-воды (т. е. по первому методу оценки морозостойкости марка бетона в обоих случаях соответствует F1000). На наш взгляд, общность отмеченной тенденции изменения прочности особо плотного бетона в процессе испытаний на морозостойкость и показателя морозостойкости базируется на примерном соответствии параметров его структуры. В рассмотренных случаях при имеющейся разнице в условиях и особенно во времени проведения испытаний бетон характеризовался практически равенством величины водопоглощения по массе (~2,0 %) и водонепроницаемостью марки W20. То есть структурное строение (соответственно пористость и проницаемость) цементного камня в бетоне и бетона в целом было примерно на одном уровне, что и отрази-

лось в практическом равенстве результатов испытаний.

ВЫВОДЫ

1. Введение в состав бетона воздухововлекающих добавок, безусловно, способно обеспечить его морозостойкость на уровне марки F200 и даже F300 при испытаниях в солевой среде. С целью дальнейшего повышения морозостойкости бетона рационально добиваться одновременного увеличения его плотности и непроницаемости наряду с высокой прочностью. Оптимальное сочетание этих факторов способно обеспечить устойчивость цементного бетона к комплексному воздействию деструктивных эксплуатационных факторов.

2. Установленные закономерности влияния механических нагрузок позволяют понять причины ускоренной деструкции бетона, подверженного в процессе эксплуатации комплексному воздействию среды, усиленному их действием.

3. Следует отметить, что оценка морозостойкости цементного бетона по снижению прочности на 5 % от исходной для высокопрочного бетона не рациональна. Очевидно, что снижение прочности от 80–90 МПа и более на 5 % (т. е. на 4,0–4,5 МПа) при практически полном сохранении структуры и целостности материала, а также прочности на уровне 75–85 МПа не соотносится с потерей эксплуатационной надежности. Понятно, что такой бетон будет обеспечивать ее длительный период. В этой связи представляется необходимым критически переоценить требования действующих нормативов об обязательном введении в состав бетона (например, дорожного назначения) воздухововлекающих добавок. Естественно, для этого нужно провести многоплановые и объемные исследования проблемы повышения морозостойкости бетона с учетом возможностей, которые обеспечивают современные химические и минеральные добавки в части роста его плотности, непроницаемости и прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батяновский, Э. И. Оценка эксплуатационной долговечности тяжелого бетона по критерию «остаточной» морозостойкости / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович // Автомобильные дороги и мосты. 2010. Т. 6, № 2. С. 49–59.
2. Попов, Н. Д. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей среды / Н. Д. Попов, В. А. Невский // Сборник / Мос-

- ковский инженерно-строительный институт имени В. В. Куйбышева. М., 1957. № 15. С. 73–90.
3. Шестоперов, С. В. Цементный бетон в дорожном строительстве / С. В. Шестоперов. М.: Дориздат, 1950. 132 с.
 4. Стольников, В. В. Исследования по гидротехническому бетону / В. В. Стольников. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1953. 330 с.
 5. Горчаков, Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. М.: Стройиздат, 1965. 195 с.
 6. Powers, T. C. Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete / T. C. Powers // Journal Proceedings. 1945. Vol. 41, No 1. P. 245–272.
 7. Powers, T. C. Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing / T. C. Powers, R. A. Helmuth // Proceedings Highway Research Board. 1953. Vol. 32. P. 285–297.
 8. Батыновский, Э. И. Особо плотный бетон сухого формования / Э. И. Батыновский. М.: НП ООО «Стринко», 2002. С. 103–108.
 9. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
 10. Ахвердов, И. Н. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями / И. Н. Ахвердов, И. В. Станишевская // ДАН БССР. 1967. Т. 11, № 4. С. 320–323.
 11. Иванов, Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф. М. Иванов. М.: Транспорт, 1968. 175 с.
 12. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М. А. Шалимо. Минск: Выш. шк., 1986. 200 с.
 13. Батыновский, Э. И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э. И. Батыновский, А. И. Бондарович // Вестник БНТУ. 2008. № 4. С. 5–16.
 14. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. М.: Госстройиздат, 1962. 96 с.
 15. Батыновский, Э. И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей / Э. И. Батыновский. Минск, 2002. 351 с.
 16. Бриджмен, П. В. Новейшие работы в области высоких давлений / П. В. Бриджмен. М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 300 с.
 17. Конопленко, А. И. К вопросу теории морозостойкости бетона / А. И. Конопленко // Сб. тр. Ростовского инженерно-строительного института. Ростов н/Д, 1958. Вып. XII. С. 105–120.
 18. Зацепина, Г. Н. Свойства и структура воды / Г. Н. Зацепина. М.: Из-во Москов. ун-та, 1974. С. 48–80.
 19. Попов Н. Д., Невский В. А. (1957) To the Question of Concrete Fatigue in Multiple Cycles of Alternating Environmental Influences. *Moscow State University of Civil Engineering named after V. V. Kuibyshev. Collection No 15*. Moscow, 73–90 (in Russian).
 20. Shestoporov S. V. (1950) *Cement Concrete in Road Construction*. Moscow, Dorizdat Publ. 132 (in Russian).
 21. Stolnikov V. V. (1953) *Research on Hydraulic Concrete*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 330 (in Russian).
 22. Gorchakov G. I., Kapkine M. M., Skramtaev B. G. (1965) *Increasing the Frost Resistance of Concrete in the Structures of Industrial and Hydraulic Facilities*. Moscow, Stroyizdat Publ. 195 (in Russian).
 23. Powers T. C. (1945) Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *Journal Proceedings*, 41 (1), 245–272.
 24. Powers, T. C., Helmuth R. A. (1953) Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing. *Proceedings Highway Research Board*, 32, 285–297.
 25. Batyanovskii E. I. (2002) *Extra Dense Dry-Formed Concrete*. Moscow, Publishing House of Scientific Production Enterprise with Limited Liability “Strinko”, 103–108.
 26. Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods for their Protection*. Moscow, Stroyizdat Publ. 536 (in Russian).
 27. Akhverdov I. N., Stanishevskaya I. V. (1967) Mechanism of Destruction of Porous Materials when Saturated with Salts. *Doklady Akademii Nauk Belorusskoi SSR* [Reports of Academy of Sciences of Belarussian Soviet Socialist Republic], 11 (4), 320–323 (in Russian).
 28. Ivanov F. M. (1968) *Corrosion Protection of Reinforced Concrete Transport Structures*. Moscow, Transport Publ. 175 (in Russian).
 29. Shalimo M. A. (1986) *Corrosion Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures*. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 200 (in Russian).
 30. Batyanovsky E. I., Bondarovich A. I. (2008) Frost and Salt Resistance of Concrete Subjected to Mechanical Stress. *Vestnik BNTU* [Bulletin of Belarusian National Technical University], (4), 5–16 (in Russian).
 31. Berg O. Ya. (1962) *Physical Foundations of the Theory of Concrete and Reinforced Concrete Strength*. Moscow, Gosstroyizdat Publ. 96 (in Russian).
 32. Batyanovsky E. I. (2002) *Fundamentals of Technology for Manufacture of Concrete and Reinforced Concrete Products and Structures Using Dry Concrete Mixes*. Minsk. 351 (in Russian).
 33. Bridgman P. W. (1948) *Recent Work in the Field of High Pressures*. Moscow, State Publishing House of Foreign Literature. 300 (in Russian).
 34. Konoplenko A. I. (1958) To the Question of the Theory of Concrete Frost Resistance. *Sb. tr. Rostovskogo Inzhenerno-Stroitel'nogo Instituta* [Proceedings of Rostov Civil Engineering Institutes]. Rostov-on-Don, XII, 105–120 (in Russian).
 35. Zatsepina G. N. (1974) *Properties and Structure of Water*. Moscow, Publishing House of Moscow University, 48–80 (in Russian).

Поступила 14.10.2021

Подписана в печать 21.12.2021

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. Batyanovskii E. I., Bondarovich A. I. (2010) Evaluation of Operational Durability of Heavy Concrete by the Criterion of “Residual” Frost Resistance. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], 6 (2), 49–59 (in Russian).

Received: 14.10.2021

Accepted: 21.12.2021

Published online: 28.01.2022

Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering

B. M. Khroustalev¹⁾, Liu Tinguo²⁾, Yu. H. Aliakseyeu¹⁾, Li Zhongyu²⁾,
V. D. Akeliev¹⁾, V. T. Minchenya¹⁾

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

²⁾Gaoyuan Company (Henan Province, People's Republic of China)

© Белорусский национальный технический университет, 2022

Belarusian National Technical University, 2022

Abstract. Scientific and practical calculations on the thermal stability of typical automobile road surface (semi-limited objects) with fluctuations in air temperatures, transitions from positive to negative, with actual heat transfer coefficients, thermal conductivity of components, specific mass isobaric heat capacities, material densities, periods of regular fluctuations are presented. The study shows that temperature fluctuations occur in road surfaces, therefore deformations are brought about in them, generating thermal cracks. Thermal deformations include free, proportional to temperature gradients, stressed deformations due to temperature stresses, characterized by linear thermal expansion coefficients. In road materials, physical and mechanical properties change over time: strength, moduli of elastic longitudinal deformations, shear, transverse deformation coefficients. Thus, the temperature of pavement materials depends on the coordinates, time, and thermophysical characteristics of the materials. Thermal engineering calculations have shown that many road surfaces have limited thermal stability; under the influence of relatively small external influences, they are more stable (supercooled water vapor exists for a short time, turning into a liquid, saturated, supersaturated steam into a superheated liquid, this depends on the radiation characteristics of the surfaces, the presence of external disturbances, etc.). Thus, a complex non-stationary thermal regime takes place, when the temperature fields of the coatings, their gradients of temperature potentials, and masses depend on the boundary conditions of the 1st–4th kind. A citation analysis of the data of the Journal Citation Reports of world scientific serial publications has been developed to carry out research on heat and mass transfer in road surface. The analysis shows that in order to improve the reliability and durability of pavements, fundamental studies of both the physical and technical and thermal properties of all components of road construction mixtures are of great importance.

Keywords: road surface, pavement, structure, heat- and mass transfer, coatings, heat exchange, characteristics, model, coefficient, condition, research

For citation: Khroustalev B. M., Liu Tinguo, Aliakseyeu Yu. H., Li Zhongyu, Akeliev V. D., Minchenya V. T. (2022) Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering. *Science and Technique*. 21 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35>

Теплотермодинамические аспекты дорожных одежд

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Б. М. Хрусталеv¹⁾,
Лю Тингуo²⁾, канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексееv¹⁾, Ли Чжуньюй²⁾,
докт. техн. наук, проф. В. Д. Акельев¹⁾, канд. техн. наук, проф. В. Т. Минченя¹⁾

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

²⁾Компания «Гаююань» (провинция Хэнань, Китайская Народная Республика)

Реферат. Представлены научно-практические расчеты теплоустойчивости типовых автомобильных дорожных покрытий (полуограниченные объекты) при колебаниях температур воздуха (переходы от положительных к отрицательным значениям), приводятся реальные коэффициенты теплоотдачи, теплопроводность компонентов, удельные массовые изобарные теплоемкости, плотности материалов, периоды регулярных колебаний. Исследования показывают, что в дорожных покрытиях имеют место флуктуации температур, поэтому в них возникают деформации, генерирующие

Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Khroustalev Boris M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

температурные трещины. Температурные деформации включают свободные, пропорциональные градиентам температур напряженные деформации, обусловленные температурными напряжениями, характеризующиеся коэффициентами линейных температурных расширений. С течением времени в дорожных материалах изменяются их физико-механические свойства: прочность, модули упругих продольных деформаций, сдвига, коэффициенты поперечной деформации. Таким образом, температура дорожных покрытий зависит от координат, времени и теплофизических характеристик материалов. Теплотехнические расчеты показали, что многие дорожные покрытия имеют ограниченную теплоустойчивость; под влиянием сравнительно малых внешних воздействий более устойчивы (переохлажденный водяной пар через короткое время превращается в жидкость, а насыщенный, перенасыщенный пар – в перегретую жидкость, это зависит от радиационных характеристик поверхностей, наличия внешних возмущений и т. д.). То есть имеет место сложный нестационарный тепловой режим, когда температурные поля покрытий, их градиенты потенциалов температур, массы зависят от граничных условий 1–4-го рода. Разработан цитат-анализ с применением данных Journal Citation Reports отбора мировых научных серийных изданий для выполнения исследований по тепло- и массопереносу в дорожных покрытиях. Анализ показывает, что для повышения надежности и долговечности дорожных одежд важны фундаментальные исследования как физико-технических, так и теплофизических свойств всех компонентов дорожно-строительных смесей.

Ключевые слова: дорожная одежда, структура, тепло- и массоперенос, покрытия, теплообмен, характеристики, модель, коэффициент, состояние, исследование

Для цитирования: Теплотермодинамические аспекты дорожных одежд / Б. М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35>

Introduction

Roads at different temperatures constitute open nonlinear heterogeneous thermodynamic systems. All types of their deformations should be viewed through the lens of synergetics referring to the methodology of general scientific level focusing the surface material components structuring at critical temperatures. The specific dissipative structures resulted from these processes are adapted to ambient conditions for the reason that due to heat and mass transfer the road pavement has a complex structure formed under the dissipation of energy and mass [1–4].

Such a pavement structure can be provided considering the Benard effect when convection occurs in a viscous liquid layer at a certain difference in surface temperatures with the hexagonal cells formation due to molecular motion or intensity jump in heat transfer. In this case, with an increase in the temperature difference, the rate of convective heat transfer increases. With decreasing temperature, the pavement dissipates part of the accumulated heat into the environment, and temperature stresses change. Different deformations occur when the stress of the ultimate strength of the road components are identical; removal of a part of the heat accumulated in the road covering due to free surface deformation acquires an abrupt nature. For example, a decrease in air temperature by 30 °C leads to a change to 0.45–0.50 m in the road temperature pattern [5].

The ambiguous nature of heat and mass transfer processes during road construction and service creates the prerequisite for the multicomponent secondary resources technology with the effective recycling of used materials containing assessment

of their properties, heat and mass transfer processes, their physical and technical indicators for specific mixtures. At the same time, the durability, thermal and physical specification, energy efficiency of road pavement depend on validity of their physical and mathematical models.

Pavement models and structures

Start with, it is necessary to determine the area of research on methods of generalizing information on mass and heat transfer; factual materials and much more besides. The quantity of the patented road materials and the possibilities of experimental research can be brought into compliance by increasing the quality of experimental work or by optimizing the calculations [6–10].

Analysis of the mechanisms of heat and mass transfer processes in road objects should facilitate the relocation of research on engineering the materials with contemplated properties from the laboratory into a multidimensional mathematical inquiry model. Multidisciplinary specialists should initiate modern pavement concept depending on the required material pattern.

The calculation of thermophysical characteristics of ingredients, mixtures, composite materials is usually performed applying analytical dependencies and correlation obtained because of physical models and experimental data approximations upon which they are accepted. Physical models of pavements can be considered corpuscular, continuous, corpuscular-continuous, etc.

Corpuscular models characterize physical properties of systems depending on their structure, forces of interaction between its molecules, atoms and the nature of their thermal motion. Continuous

models represent the road pavement and its single components as a continuous medium. Then, based on the study of various transfer processes, the dependences of the effective coefficients of transfer from the structure of their ingredients and concentration are determined [7, 11].

Corpuscular-continuum models consider the road pavement as a solid body; the molecular theory allows calculating the physical properties of a substance with its other known physical properties. Combined methods focus on mixed models applying a phenomenological approach to the calculation of generalized conductivity. They have proved to be effective in the methods of molecular physics that closely reflect the transport processes in many systems, and enabling analytical determination of coefficients of generalized conductivity of heterogeneous thermodynamic system.

In addition, the structure with closed inclusions contains a binder in which components that are not in contact with each other are distributed. A specific feature of this structure is the continuity of binder components in different directions and their discrete arrangement. Obviously, the components are geometrically unequal in a structure with inclusions. Granular and bonded materials from monolithic particles are considered as systems between structures with inclusions and interpenetrating components. Since the contacting elements, pores have a continuous range of solid ingredients, voids, therefore, there are no breaks in the contact zones of the particles, and the contact surface is much smaller than the cross-sectional area of the components. During heat and

mass transfer of granular materials, the area of their contact changes and can be transformed into a system with interpenetrating components.

In some cases, it is advisable to classify road pavement by the structure nature, the number of ingredients, their aggregate state, physical and chemical processes of component interaction and consider them as mechanical and non-mechanical. Mixtures are mechanical where the coefficients of generalized conductivity of the initial ingredients do not depend on their concentration and are not typical heterogeneous systems.

There is no gainsaying that a clear boundary between heterogeneous and homogeneous systems not always occurs. The secondary research based on the works by G. N. Dulnev, Yu. P. Zarichnyak, R. Collins, A. V. Lykov and others shows the spontaneous processes in road pavement evolve towards equilibrium state [1–5, 7, 11, 12]. It is worth noting that roads located under various climatic conditions and consideration should be given to the following physical and mechanical types of moisture bonding in the capillary-porous spaces of road and other objects held in undefined proportions (Tab. 1) [4].

In road structures, depending on the construction technology, climatological factors, their operation, schemes of various models of road material elements (for example, combined structures with interpenetrating components and inclusions, structures with interpenetrating components, with inclusions of various shapes: spherical, cubic, etc.) can be represented as follows (Fig. 1) [1, 5, 11].

Table 1

Types of moisture bonding in road surface materials [12]

Structural bonding	Bonding in microcapillaries	Bonding in macrocapillaries	Hydration bonding
Gel formation	Water absorption from the air upon direct contact	Water absorption upon direct contact in through capillaries and from the air in closed through capillaries	Water adhesion upon direct contact with the road surface
Water is captured during the gel structure formation	Capillary pressure due to the liquid surface curvature	The same	Surface tension characterized by a contact angle Θ to 90°
Gelatinous bodies (1 % solids + 99 % water)	Coating with capillaries r up to 10^{-5} cm	Coating with capillaries r more than 10^{-5} cm	Non-porous hydrated (hydrophilic) surfaces
Mechanical water retention, monomolecular layer adsorptively bound	Mechanical bonding of water (side layer adsorptively bound)		Mechanical water retention (surface moisture layer adsorptively bound)
Evaporation, moisture squeezing by pressure, structural failure	Higher pressure than capillary, evaporation		Mechanical methods, evaporation
The body changes its properties, a quasi-solid body is formed. Water immobilizes in the structure and changes its properties	The bulk of the absorbed water is free and retains its properties. The body retains its basic properties changing some of them due to the adsorbed water formation		

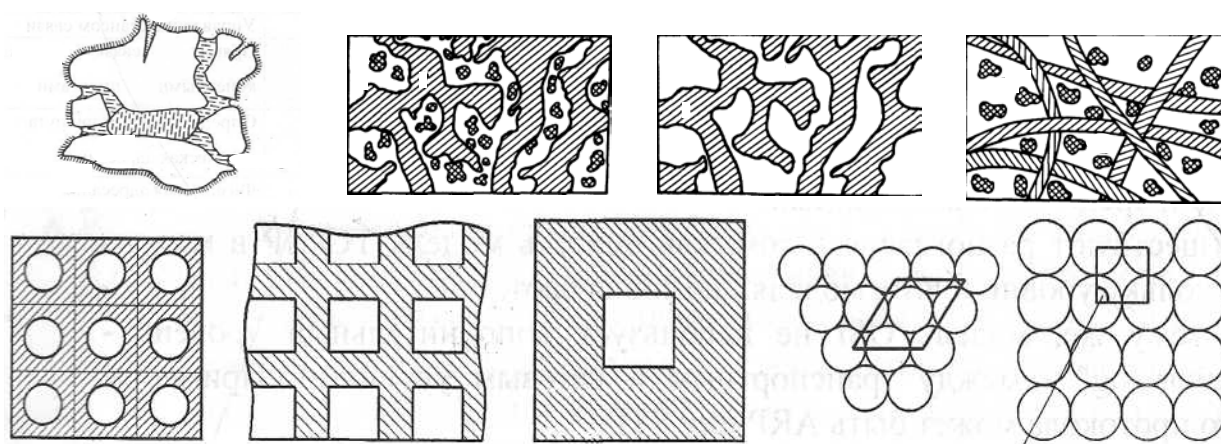


Fig. 1. Structural schemes and models of mixtures in road surface materials

Thermodynamic stability of road pavement

The studies have shown that low external influences contribute to the transition from the labile state of the road platform structure to the stable one. States of relatively stable equilibrium (meta-stable) are those states when the road surfaces keep in for a long time, and low external influences that cause changes in the thermophysical parameters of the road do not lead to a transition to other states. In other cases, the road platform should be considered in a metastable state persisting intermediate, relatively stable and labile [13].

If the system does not exchange heat, mass, mechanical work with the ambient environment the specific internal energy and specific volume are usually constant for it. Since the entropy of an isolated system tends to a maximum, therefore, it is maximum in an equilibrium isolated road system ($ds = 0$), $Tds \geq du + pdv$, i. e. $ds \geq 0$ for irreversible processes in isolated systems. The $>$ sign corresponds to an unstable equilibrium of road surface.

If $s = s_{\max}$ then $ds = 0$; $d^2s < 0$ arguing the entropy to be maximum in equilibrium. When the road pavement interacts with the environment, the equilibrium conditions change and depend on the intensity of the interaction of the “road platform – ambient environment” system.

The following conditions for mass thermophysical interactions (junctions) of the road platform (with air, upper atmosphere) are known:

a) the heat exchange occurs in the “road platform – ambient environment” system at constant values of pressure and entropy;

b) the specific volumes of the road platform components are constant, the heat exchange with the environment is stationary ($dv = 0$, $ds = 0$);

c) if $du \leq Tds - pdv$ then $u = u_{\min}$, $du = 0$, $d^2u > 0$;

d) as $s = \text{const}$, $p = \text{const}$ ($dp = 0$, $ds = 0$) since $h = u + pv$, $dh = du + pdv + vdp$, therefore, $dh \leq Tds + vdp$ and consequently the criterion of road platform equilibrium is $h = h_{\min}$, $dh = 0$, $d^2h > 0$.

Significant factors affecting the calculation accuracy when the probability of transition from one state to another increases (vapor – water, ice – water, etc.), in addition, some substances in the solid state have several phases. For example, water is in a liquid state in temperatures of 0–100 °C and under atmospheric pressure, it turns into ice at 0 °C and under atmospheric pressure, and it turns into a vapor state at a temperature above 100 °C. When the pressure changes, the temperature changes at the points of phase transitions: from the liquid phase to the gaseous and vapor phases, here the heat is spent on expansion work and overcoming the intermolecular interaction forces and destroys the associated complexes with a decrease in the substance density [13].

During melting and sublimation the heat of phase change is spent on the crystalline failure of the elements. Change from solid to gaseous phase usually occurs at low pressures (the so-called sublimation); the reverse process is desublimation where the phase densities change sharply: melting and vaporization.

Therefore, the conclusion is in the disunity of research in the mathematical modeling of the calculation of thermal and moisture processes in real road objects. In this regard, based on the calculation profile the goal is to establish and develop effective experimental studies of restored, erected,

and modernized road objects with the most comprehensive consideration of the specifics of impact on them of thermodynamic mass transfer factors, design solutions and other features [6, 7].

To achieve this, the following tasks were considered:

- to develop physical and mathematical models of the processes in various road pavement bases on the known solutions of the internal heat and mass transfer under various boundary conditions as close as possible to real ones;

- on the basis of the obtained solutions, the development of engineering calculation methods for the optimal thermophysical design of single and multi-layer roads as well as substantiated methods of field studies of road objects for heat and mass permeability were implemented.

The scientific novelty of the project is the presentation of combined methods for calculating heat and mass transfer processes in multilayer road pavement with various thermal, physical and mechanical specifications, boundary and initial conditions. At present, there are data of calculating the thickness of hydroaerodynamic and thermal boundary layers under boundary conditions of the 1st–3rd types [2–4]. At the same time, it was assumed that the road durability during the operation period is a mix of preventive road maintenance, measures for the road traffic engineering and safety when its transport with operational condition and safety are ensured taking into account the rainfall intensity, constructive, heat and mass transfer specifications of covering.

In this case, the mathematical problem statement should include a correction of differential equations of heat and mass conductivity, radiation-convective factors describing the process of heat transfer through the layers of pavement, initial conditions, temperature field in them and on the surface at the initial time point, boundary conditions, internal and external problems. Internal problems are related to real thermodynamic processes, heat and mass transfer in various systems of road pavement with justified coefficients of thermal conductivity, vapor and mass permeability, filtration and under boundary conditions of the 1st–4th types. The external are related to the specific handling a problems of heat and mass transfer from interfacing cement-concrete surfaces of road pavement (sand, soil, concrete, etc.), heat and mass conductivity potentials, coefficients

of heat assimilation, potential, heat, and thermal diffusivity, etc. In this case, the decisive function is of the temperature fields at stationary and non-stationary heat mass flow, in thermal, dynamic boundary layers characterized by sharp temperature fluctuations, their gradients of heat assimilation, heat and mass stability, isotherms of sorption – desorption.

Road pavement in various climatic regions can be represented as flat, single- and multi-layered, with curved surfaces where the temperature differs from the temperature of the “incident” (contacting) liquid: droplet, vapor, gaseous, etc., at flow rates depended on coordinates, aero-, hydro- and gas-rheological parameters (Fig. 2) [2]. Obvious manageable (correlated), uncontrollable factors depend on multifactorial efficiency determined by capital investments, construction duration, economic and environmental sustainability, minimum accident rate (people, transport, etc.), construction technology, operation, development of design and computer comprehensive proposals (justification), practical solutions.

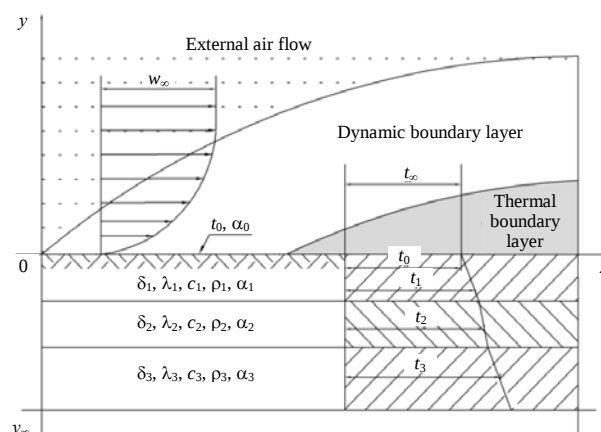


Fig. 2. Diagrams of dynamic and thermal boundary layers on a partially heated cement-sand road pavement (heated areas are shaded)

Differential and integral curves of material pore size distribution were obtained for various types of concrete hardening. Structural specifications of cement-sand and other materials of external enclosing structures are presented using X-ray micro-analyzers. Diagrams of the dynamic and thermal boundary layers at various sections of the cement-sand road pavement as well as stereo images of the surface fracture, filtration flow dependence on pressure drops at various moisture content and material density are shown in Fig. 3, 4.

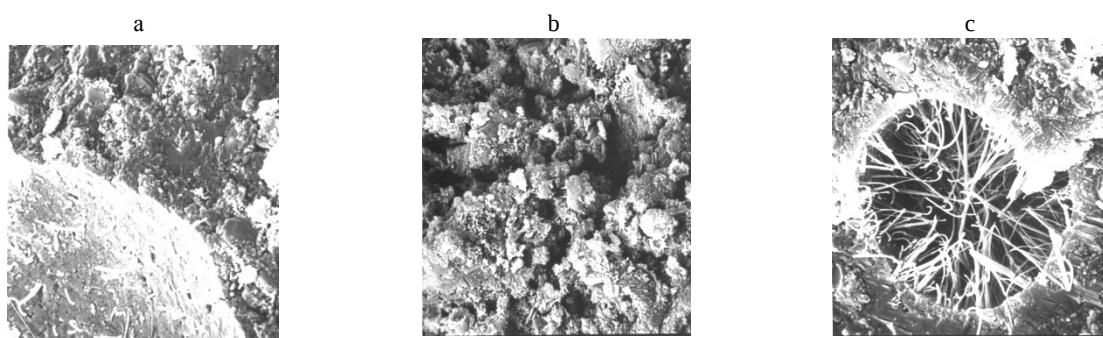


Fig. 3. Stereo images of the fracture of the cement-sand samples surface (500 times magnification)

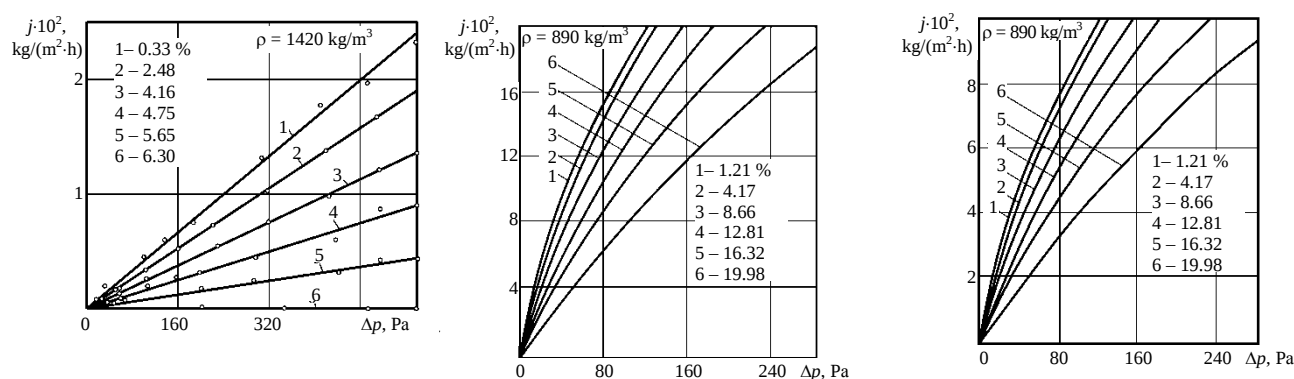


Fig. 4. Dependences of filtration flows on pressure drops at different moisture content and density of materials

Stable equilibrium of road surface

A state of relatively stable equilibrium (meta-stable) is a state when the road surface keeps in for a long time, and slight deviation in road thermo-physical parameters do not lead to local changes. The task is to determine an equilibrium state for each directed real and spontaneous process. A road pavement is a system that does not exchange heat and work with the ambient environment, therefore, the internal energy and specific volume are constant for it; the entropy tends to a maximum, i. e. $dS = 0$ for reversible processes, and $dS \geq 0$ should be assumed for irreversible processes.

The isobaric-isothermal potential decreases in a metastable region reaching a maximum in an equilibrium state and the only type of pavement work in the process of interaction with the ambient environment is expansion. The internal energy, entropy, free energy, isobaric-isothermal potential characterizing the conditions of thermodynamic road equilibrium with the ambient environment are the main equilibrium functions with the characteristic property [4, 13, 14]:

– if the characteristic function represented by corresponding function for each variable is known then any thermodynamic quantity can be calculated;

– if the internal energy is presented as a function of the specific volume and entropy then the other thermodynamic parameters are determined

from the formulas: $p = \left(\frac{u}{v} \right)_s$, $T = \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v$.

The entropy, free energy, isobaric-isothermal potential, etc. are calculated with the known u , v , S , p , T . If the enthalpy h is known as pressure function, entropy function then:

$T = \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_p$, $v = \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_s$.

The internal energy, dependences of free energy on the volume V and temperature T are calculated with the known h , p , S , T from the formulas:

$p = - \left(\frac{\partial h}{\partial V} \right)_T$, $S = - \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$.

I , u , h , Φ are determined with the known F , V , T , p , S , h :

$$V = -\left(\frac{\delta\Phi}{\delta\rho}\right)_T; \quad S = -\left(\frac{\delta\Phi}{\delta T}\right)_p. \quad (1)$$

If we know the dependence of isobaric-isothermal potential Φ on pressure p , temperature T it is possible to calculate the internal energy and other quantities. From the equilibrium condition for an isolated single-phase system, the temperature and pressure are the same. In a two-phase system, the general condition for phase equilibrium is that substances and their masses pass from one phase to another.

For a system with $V_{\text{syst}} = \text{const}$, $m_{\text{syst}} = \text{const}$, $u = \text{const}$:

$$V = V_1 + V_2; \quad m_{\text{syst}} = m_1 + m_2, \quad (2)$$

where 1, 2 – indices corresponding to the first and second phases.

In contrast to a one-dimensionally isolated system, in addition to the known V and u , the substance masses in each of the subsystems are known:

$$m = m_1 + m_2; \quad u = u_1 + u_2; \quad (3)$$

$$dV_1 = -dV_2; \quad dm_1 = -dm_2;$$

$$du_1 = -du_2; \quad dS_0 = 0; \quad S_0 = S_1 + S_2. \quad (4)$$

Consequently

$$dS_{\text{syst}} = dS_1 + dS_2 = 0. \quad (5)$$

Let us consider the expression for the total differential entropy of the subsystem (1). Obviously, the entropy of the subsystem S_1 should be regarded as a function of the volume V_1 , mass, i. e. $S_1 = f(V_1, u_1, m_1)$. Accordingly:

$$dS_1 = \left(\frac{\partial S_1}{\partial u_1}\right)_{V_1 m_1}; \quad du_1 + \left(\frac{\partial S_1}{\partial V_1}\right)_{u_1 m_1}; \\ dV_1 + \left(\frac{\partial S_1}{\partial m_1}\right)_{u_1 V_1} dm_1,$$

since:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial u}\right)_{V, m_1} = \frac{1}{T}; \quad \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_{u, m} = \frac{P}{T}; \quad \left(\frac{\partial S}{\partial m}\right)_{u, V} = -\frac{\varphi}{T}.$$

Therefore, the expressions for the first and second subsystems may be written as:

$$dS_1 = \frac{1}{T_1} du_1 + \frac{p_1}{T_1} dV_1 - \frac{\varphi_1}{T_1} dm_1; \\ dS_2 = \frac{1}{T_2} du_2 + \frac{p_2}{T_2} dV_2 - \frac{\varphi_2}{T_2} dm_2.$$

Thereat [1]

$$\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) du_1 + \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2}\right) dV_1 - \\ - \left(\frac{\varphi_1}{T_1} - \frac{\varphi_2}{T_2}\right) dm_1 = 0.$$

For the equality of the left side of the equation, the factors at the differentials must be equal to zero [2]:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = 0; \quad \frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} = 0; \quad \frac{\varphi_1}{T_1} - \frac{\varphi_2}{T_2} = 0.$$

Therefore, if the phases are in equilibrium their temperatures, pressures, chemical potentials are equal to each other as in a system with the number of existing phases more than two.

CONCLUSIONS

1. Processing of analytical and experimental engineering calculations of thermal stability of traditional highway pavement suggests to consider them as semi-limited bodies with cyclical temperature fluctuations in atmospheric air, heat transfer coefficients, convective heat exchange in an unlimited space with natural, forced convection, radiation – between the atmosphere, surfaces of roadside construction objects, forest plantations, vehicles. Nonstationary heat transfer occurs at the temperature fields, their gradients, and mass ratios correspondence to boundary conditions of the 1st to 4th types.

2. Research, computational analysis of physical, technical, heat and mass transfer processes in road pavement, their coverings, boundary thermal and dynamic layers show the importance of studying such indicators as a coefficient of linear thermal expansion, thermal diffusivity, heat assi-

milation of mixture components, etc. upon which strength, reliability and durability of road pavement including road covering and roadbed depend on.

The research has been carried out in accordance with the National key R&D Program of China (SQ2018YFE010143) and the implementation of the Henan innovation demonstration project (191110211500) with the support of the Henan Center for Outstanding Overseas Scientists, Grant Number G_TZS 2018006 (People's Republic of China, Henan Province).

REFERENCES

1. Akelyev V. D. (2010) *Heat and Mass Transfer in Confined Spaces of Building Structures and Structures*. Minsk, Belarusian National Technical University. 317 (in Russian).
2. Pshembayev M. K. (2017) Physical and Chemical Fundamentals of Protection Processes for Surface Layer of Concrete Road Paving by Impregnating Compositions. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (2), 144–152. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-144-152> (in Russian).
3. Pshembayev M. K., Kovalev Ya. N., Shevchuk L. I. (2017) Analysis of Stress State in Upper Layer of Road Concrete Pavement with Temperature Action. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (4), 282–288. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-282-288> (in Russian).
4. Akelyev V. D. (2013) *Heat and Mass Transfer in Confined Spaces of Building Structures*. Minsk. 45 (in Russian).
5. Misnar A. (1968) *Thermal Conductivity of Solids, Liquids, Gases and their Compositions*. Moscow, Mir Publ. 464 (in Russian).
6. Tingguo Liu, Zankavich V. N., Aliakseyeu Yu. H., Khroustalev B. M. (2019) Recycling of Materials for Pavement-Dressing: Analytical Review. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 18 (2), 104–112. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-104-112>.
7. Khroustalev B. M., Tingguo Liu, Akeliev V. D., Zhongyu Li, Aliakseyeu Yu. H., Zankavich V. V. (2019) Heat Resistance and Heat-and-Mass Transfer in Road Pavements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 536–546. <https://doi.org/10.21122/1029-2019-62-6-536-546>.
8. Khroustalev B. M., Veranko V. A., Zankavich V. V., Aliakseyeu Yu. G., Xuejun Yu., Shang B., Shi J. (2020) Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (3), 181–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194>.
9. Khroustalev B., Liu T., Busel A., Li Zh., Veranko U., Zankavich V., Shang B. (2020) Estimation and Methods of Prediction the Structural and Mechanical Properties of RAP-Composites. *Izvestiya NAN Respubliki Kazakhstan. Seriya Geologii i Tekhnicheskikh Nauk = News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Geology Series and Technical Sciences*, (2), 187–197 (in Russian).
10. Khroustalev B. M., Leonovich S. N., Potapov V. V., Grushevskaya E. N. (2017) Composite Material Based on Cement Binders Modified with SiO₂ Nanoadditives. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (6), 459–465. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-6-459-465>.
11. Dulnev G. N., Zarichnyak Yu. P. (1974) *Thermalconductivity of Mixtures and Composite Materials*. Leningrad, Energiya Publ. 264 (in Russian).
12. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. (2018) Increasing Strength of Concrete with Plasticizing Additive Based on Nanostructured Carbon. *Stroitelnye Materialy = Construction Materials*, (6), 67–72 (in Russian).
13. Khroustalev B. M., Akeliev V. D., Aliakseyeu Yu. H., Shi Jicun, Zankovich V. V., Liu Tingguo (2018) Specific Features of Heat and Mass Transfer Processes in Road Dressings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 517–526. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-517-526>.
14. Kammerer I. S. (1965) *Thermal Insulation in Industry and Construction*. Moscow, Stroyizdat Publ. 378 (in Russian).

Received: 29.09.2021

Accepted: 30.11.2021

Published online: 28.01.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-36-41>

УДК 69.059.7 (075.8)

Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктурированной железобетонной конструкцией

Доктора техн. наук, профессора В. В. Молодин¹⁾, С. Н. Леонович²⁾

¹⁾Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Новосибирск, Российская Федерация),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Сцепление бетонов является решающим фактором при восстановлении работоспособности железобетонных конструкций. Во время эксплуатации железобетона в агрессивной среде агрессивные агенты через поры и капилляры проникают к арматуре, которая начинает корродировать. Образующиеся продукты коррозии обладают большим объемом, чем сам металл, и создают давление на защитный слой бетона изнутри. В конечном счете, он отслаивается, незащищенная арматура еще интенсивнее разрушается, и вскоре конструкция теряет несущую способность. Стандартное восстановление включает в себя очистку поврежденной поверхности, дополнительное армирование и обетонирование конструкции. Однако часто спустя некоторое время наблюдается отслоение ремонтного бетона. Это происходит потому, что поврежденный коррозией слой не обеспечивает качественного сцепления «старого» бетона с «новым». Причина – в разрушении структуры поверхностного слоя бетона агрессивными воздействиями. В большинстве случаев агрессивным агентом выступает углекислый газ. Исследование влияния углекислого газа на цементный камень показало разрушение кристаллического каркаса материала и снижение его когезионной прочности. Микрофотографии поврежденного и неповрежденного коррозией цементного камня, сделанные с увеличением в 7000 раз, убедительно демонстрируют результаты разрушительной работы углекислоты. Это существенно влияет на сцепление. Применение форсированного разогрева ремонтной смеси при ее укладке в контакт с поверхностью восстанавливаемой конструкции ведет к появлению температурных градиентов, усиливающих термодиффузию. И чем больше температурный градиент, тем интенсивнее и глубже проникновение продуктов растворения цемента из ремонтного бетона в тело бетона восстанавливаемой конструкции. А это, в свою очередь, способствует пропитыванию поврежденного цементного камня жидкой фазой из ремонтной бетонной смеси. Кристаллизуясь, продукты растворения цемента формируют в поврежденном цементном камне новую кристаллическую структуру, которая усиливает его когезионную прочность и связывает ремонтный бетон с неповрежденной структурой бетона восстанавливаемой конструкции, гарантируя качество сцепления.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, восстановление, углекислый газ, карбонизация бетона, сцепление бетонов, бетонная смесь, форсированный разогрев

Для цитирования: Молодин, В. В. Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктурированной железобетонной конструкцией / В. В. Молодин, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 36–41. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-36-41>

Bonding of Recovery Concrete with Corrosion-Destroyed Reinforced Concrete Structure

V. V. Molodin¹⁾, S. N. Leonovich²⁾

¹⁾Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Novosibirsk, Russian Federation),

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

Abstract. The adhesion of concrete is a decisive factor in restoring the performance of reinforced concrete structures. During the operation of reinforced concrete in an aggressive environment, aggressive agents penetrate through the pores

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-61-56
leonovichsn@tut.by

Address for correspondence

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

and capillaries to the reinforcement which begins to corrode. The resulting corrosion products have a large volume than the metal itself, and create pressure on the protective layer concrete from the inside. Ultimately, it exfoliates, the unprotected reinforcement is destroyed even more intensively, and soon the structure loses its bearing capacity. Standard restoration includes cleaning the damaged surface, additional reinforcement and concrete coating of the structure. However, after sometime, peeling of the repair concrete is often observed. This is because a layer damaged by corrosion does not provide high-quality adhesion of the "old" concrete to the "new" one. The reason is the destruction of the structure of the surface concrete layer by aggressive influences. In most cases, carbon dioxide is an aggressive agent. The study of the effect of carbon dioxide on cement stone has shown the destruction of the crystalline framework of the material and a decrease in its cohesive strength. Micrographs of cement stone damaged and undamaged by corrosion, taken with magnification 7000 times, convincingly demonstrate the results of the destructive work of carbon dioxide. This has a significant effect on grip. The use of forced heating of the repair mixture when it is placed in contact with the restored structure leads to the appearance of temperature gradients that enhance thermal diffusion. And the greater the temperature gradient, the more intense and deeper the penetration of the cement dissolution products from the repair concrete into the concrete body of the structure being restored. And this, in turn, contributes to the impregnation of the damaged cement stone with the liquid phase from the repair concrete mixture. Crystallizing, the cement dissolution products form a new crystalline structure in the damaged cement stone, which enhances its cohesive strength and binds the repair concrete to the intact concrete structure of the restored structure, ensuring the quality of adhesion.

Keywords: reinforced concrete structures, restoration, carbon dioxide, concrete carbonation, concrete adhesion, concrete mixture, forced heating

For citation: Molodin V. V., Leonovich S. N. (2022) Bonding of Recovery Concrete with Corrosion-Destroyed Reinforced Concrete Structure. *Science and Technique*. 21 (1), 36–41. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-36-41> (in Russian)

Введение

При восстановлении работоспособности железобетонных конструкций, длительное время эксплуатировавшихся в агрессивной среде, чаще всего применяется технология монолитной обоймы. Поверхность разрушенной конструкции тщательно очищается, в основном с использованием пескоструйной технологии, а затем обетонируется с дополнительным армированием (рис. 1).

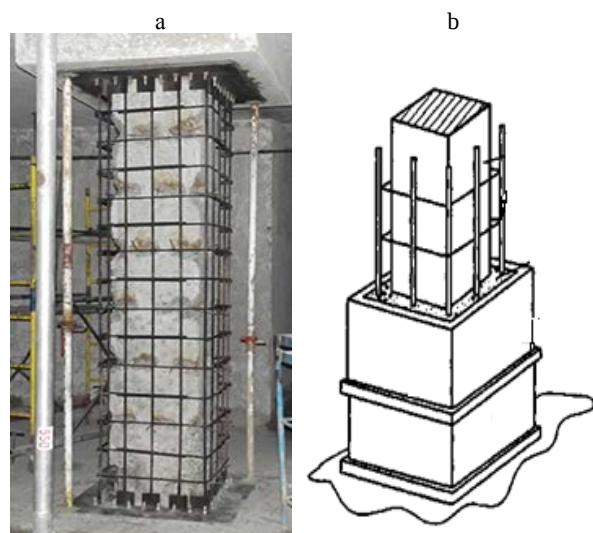


Рис. 1. Восстановление железобетонной колонны с использованием технологии монолитной обоймы: а – дополнительное армирование; б – укладка ремонтной бетонной смеси в опалубку

Fig. 1. Restoration of reinforced concrete column using monolithic cage technology:
a – additional reinforcement; b – laying repair concrete mixture into formwork

Однако в практике восстановления конструкций, разрушившихся вследствие эксплуа-

тации в агрессивной среде, чаще при одностороннем обетонировании, наблюдается отслоение ремонтного слоя от восстанавливаемой конструкции. Это ведет к развитию коррозии несущей конструкции, но теперь уже скрытой ремонтным слоем. В основном такое происходит из-за некачественного или нарушенного сцепления «старого» и «нового» бетонов в зоне их контакта. Причина этого – разрушение структуры поверхностного слоя бетона агрессивными воздействиями. Для большинства случаев агрессивным агентом выступает углекислый газ.

Карбонизация бетона и цементного камня

Углекислый газ, или диоксид углерода (CO_2), – обязательный и необходимый компонент воздуха, средняя концентрация которого в атмосфере на сегодняшний день достигла 417,1 ppm (миллионных долей по объему), или 0,042 % [1]. Причины этого – естественные источники (перегнивание органических материалов, выделение CO_2 океанами, природные пожары, извержения вулканов) и антропогенная эмиссия (сжигание ископаемого топлива, вырубка лесов под землепользование и промышленные выбросы). При этом выбросы углекислого газа за счет деятельности человека увеличиваются по нарастающей [2]. Лидерами выбросов CO_2 в атмосферу в 2020 г. стали Китай (11535,2 млн т), США (5107,0 млн т), Индия (2597,36 млн т) и Россия (1792,02 млн т) [3]. В России 45,9 % диоксида углерода выделяется металлургическими заводами, 24,7 % – предприятиями по производству продукции из минерального сырья, 7,2 % – химической промышленностью [4]. Это ведет к тому, что конструкции зданий

и сооружений в данных отраслях промышленности, а также в некоторых других (например, пищевой) эксплуатируются в условиях активной углекислотной агрессии.

Несущие и ограждающие конструкции, которые используются для строительства промышленных зданий, как правило, изготавливаются из железобетона, основой которого является цементный камень – результат гидратации цемента. Исследованиями П. А. Ребиндера [5], О. П. Мчедлова-Петросяна [6] и других ученых установлено, что цементный камень формируется из массы, представляющей собой частицы неразложившихся зерен цементного клинкера, окруженных гелем двухкальциевого гидросиликата, непрерывно кристаллизующийся гель $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и растущие игольчатые кристаллы гидроксида кальция и трехкальциевого гидроалюмината. Сформировавшаяся из этой массы структура цементного камня – это в основном плотный гидросиликатный гель с включенными в него пластинчатыми фазами (гидроалюминаты, гидросульфалюминаты, гидроксид кальция) [6]. Причем кристаллы трехкальциевого гидроалюмината и кристаллы гидроксида кальция образуют переплетающуюся игольчатую структуру наподобие войлока, сцементированную гелем гидросиликата кальция (рис. 2). Благодаря такой структуре прочность затвердевшего цемента и бетона очень высока [7].

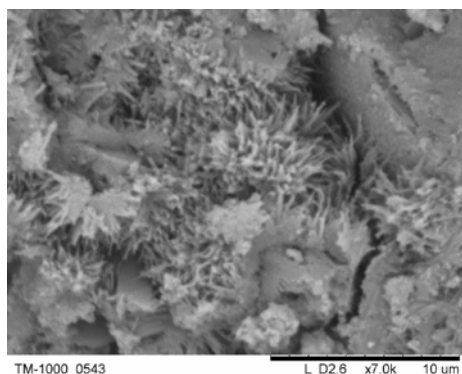


Рис. 2. Микрофотография структуры цементного камня, не разрушенной углекислотой (увеличение в 7000 раз)

Fig. 2. Micrograph of cement stone structure, not destroyed by carbon dioxide (magnification of 7000 times)

Следует заметить, что сложившаяся структура цементного камня пронизана частой сетью пор и капилляров, сформировавшихся в том числе на месте микрообъемов технологической воды, потребовавшейся для смачивания компонентов бетона и удобства перемешивания бетонной смеси при ее приготовлении и не использованной впоследствии для гидратации цемента.

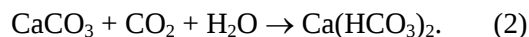
С одной стороны, система пор и капилляров влияет на прочностные характеристики материала, а с другой – обуславливает его компенсационные возможности, обеспечивает способность материала пропускать через себя под влиянием различных градиентов [8] газы, в том числе с агрессивными компонентами.

Коррозия начинается на поверхности конструкции и развивается вглубь – в поры и капилляры цементного камня. Степень воздействия газа на материал определяется видом и концентрацией кислоты, которая образуется, когда CO_2 , содержащийся в воздухе, распространяется через открытые поры бетона и растворяется в воде, находящейся внутри. Безусловно, агрессивное воздействие углекислого газа зависит от технологических факторов и условий эксплуатации конструкции. Оно заключается в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, меняющих его свойства. Взаимодействие углекислоты с гидроксидом кальция нейтрализует последний, и защитный слой бетона теряет свои свойства.

Исследованиями процессов коррозии бетонов [8] установлено, что под воздействием агрессивного вещества минералы цементного камня перерождаются в конгломерат нерастворимых соединений. Углекислота вступает в реакцию с гидроксидом кальция, в результате чего образуется карбонат кальция



Продукты реакции выделяются в твердой фазе в виде рыхлых осадков или плотных пленок на поверхности пор и капилляров [1]. Эти новообразования создают «завалы» в капиллярах, герметично запечатывая их, и нарастающее сопротивление диффузии в поверхностном слое бетона. Карбонат кальция осаждается в виде нерастворимых кристаллов, примерно на 12 % превышая объем исходного гидроксида кальция [9]. Это еще больше уплотняет карбонатный слой. Одновременно углекислота вступает в реакцию с карбонатом кальция. В результате образуется растворимый бикарбонат кальция



Конечно, со временем бикарбонат кальция частично вымывается из бетона и увеличивает объем пор, но это не оказывает существенного влияния на диффузионную проходимость для жидкостей и газов.

Разрушенная воздействием кислоты игольчатая структура материала лишает цементный камень упрочняющей основы, и он теряет коге-

зионную прочность, сохраняя при этом изначальную форму. На снимке, сделанном с помощью электронного сканирующего микроскопа ТМ-1000 в Институте химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН, комковатые образования и пленки лишь местами сшиты волокнистыми субмикрорекристаллами (рис. 3) и материал практически потерял монолитность.

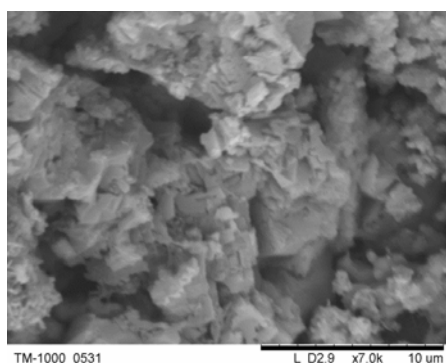


Рис. 3. Микрофотография структуры цементного камня, разрушенной углекислотой (увеличение в 7000 раз)

Fig. 3. Micrograph of cement stone structure, destroyed by carbon dioxide (magnification of 7000 times)

Механизм сцепления «старого» и «нового» бетонов

Сцепление «старого» и «нового» бетонов при восстановлении конструкций обеспечивается, с одной стороны, адгезией – способностью материала прилипнуть за счет межмолекулярного взаимодействия, с другой – диффузией, т. е. взаимопроникновением одного материала в другой. При контакте зрелого бетона с бетонной смесью включаются оба механизма. Происходит прилипание вязкой бетонной смеси к поверхности зрелого бетона, и одновременно жидкая фаза смеси, представляющая собой воду с находящимися в ней продуктами растворения цемента, мигрирует из свежесложенной бетонной смеси в зрелый бетон по порам и капиллярам за счет выравнивания концентраций вещества и разницы температур. Глубина проникновения зависит от величины химических и физических градиентов, толкающих жидкость внутрь материала.

При укладке бетонной смеси в непосредственном контакте со зрелым бетоном в нормальных условиях в работу включаются адгезия, бародиффузия, термодиффузия и диффузия за счет градиента концентрации. Порядок градиентов, формирующих диффузию, невелик и примерно одинаков. Вклад в сцепление бетонов

адгезии и суммарной диффузии также примерно одинаков, и в сумме они обеспечивают технически необходимую прочность сцепления.

Адгезия склеивает по поверхности. Мигрирующая в зрелый бетон влага несет в себе растворенные продукты гидратации клинкерных зерен – растворимые щелочи и соли, а также гидроксид кальция [6]. В дальнейшем проникшие в зрелый бетон продукты гидратации в виде гидросиликатов и гидроксидов превращаются в гель и далее – в кристаллические сростки. Возникающие новообразования вместе с адгезией связывают зрелый и твердеющий бетоны и обеспечивают их качественное сцепление. Стоит заметить, что чем интенсивнее диффузионный перенос, тем надежнее сцепление.

Возможности термодиффузии при восстановлении конструкций, поврежденных коррозией

Как установлено ранее [10], поверхностный слой железобетонных конструкций, длительное время эксплуатировавшихся в условиях углекислотной агрессии, имеет существенно сниженную когезионную прочность. Толщина этого слоя за 30 лет эксплуатации может достигать 25 мм [11].

Характерная для бетонов адгезия обеспечивает прилипание бетонной смеси к поверхности цементного камня с разрушенной кристаллической структурой, отвечающей за когезию. Диффузия при малых градиентах концентрации, давления и температуры дает слабое проникновение новообразований из бетонной смеси вглубь зрелого бетона с разрушенной силовой структурой. Она не обеспечивает достижения вновь формирующимися кристаллическими сростками глубинных, не тронутых разрушительной коррозией массивов цементного камня. Этому способствует и частичное «закупоривание» входов в капиллярную систему цементного камня обломками его компонентов, разрушенными углекислотой [8].

Очевидно, что «новый» бетон при укладке в контакте со «старым», имеющим разрушенную коррозией поверхность, благодаря адгезии и диффузии «цепляется» только за разрушенные структуры цементного камня. В последующем при возможных деформациях и других силовых воздействиях на восстановленную конструкцию происходит нарушение ее целостности. Разрушение идет по ослабленным коррозией зонам между нетронутым разрушитель-

ным воздействием кислоты массивом цементного камня и прошитым кристаллическими сростками пострадавшим приповерхностным слоем. Это и является основной причиной отслоения ремонтного слоя у восстановленных железобетонных конструкций.

Известно, что с повышением градиента температур стремительно нарастает термодиффузия (эффект Соре). Молекулы компоненты с большей массой стремятся перейти из области высоких в область более низких температур [9].

При нагреве уложенной бетонной смеси восстановления «природный насос», формируя разницу парциального давления, толкает жидкую компоненту из бетонной смеси по капиллярной системе корродированного бетона в его глубинные зоны. При этом чем больше температурный перепад, тем глубже проникновение новообразований.

Рентгеноструктурный анализ пораженных коррозией образцов бетона, находившихся в контакте с форсированно разогретой бетонной смесью, выполненный с помощью прибора D8 ADVANCE (Bruker), оснащенного программой Search, показал при температурном градиенте 80–100 °C/см наличие гидроксида кальция – промежуточной фазы гидратации цемента на глубине 15–45 мм в зависимости от подготовки поверхности [12].

Следовательно, жидкая фаза из разогретой ремонтной смеси под влиянием температурного фактора через систему капилляров, частично загроможденных завалами из комковатых образований и пленок – продуктов разрушения цементного камня, может преодолеть поврежденную приповерхностную зону и достичь неповрежденных массивов, частично проникая и в них. Из содержащихся в жидкой фазе продуктов растворения цемента в капиллярах могут сформироваться кристаллические сростки, которые укрепят разрушенный коррозией слой и соединят новообразованиями ремонтный бетон с неповрежденным массивом восстанавливаемого бетона.

Снимки структуры разрушенного углекислотой цементного камня, подвергнувшегося термопропитке посредством форсированного разогрева ремонтной бетонной смеси, уложенной в непосредственном контакте с охлажденным образцом, имеющим карбонизированную поверхность, показывают появление среди комковатых образований и пленок (продуктов разрушения цементного камня) новых кристаллических структур (рис. 4).

Исследование сцепления образцов, выдержанных в среде углекислого газа и в нормальных условиях, а затем забетонированных с форсированным разогревом смеси, показало существенное превышение прочности на разрыв против образцов, забетонированных и твердевших в нормальных условиях (рис. 5).

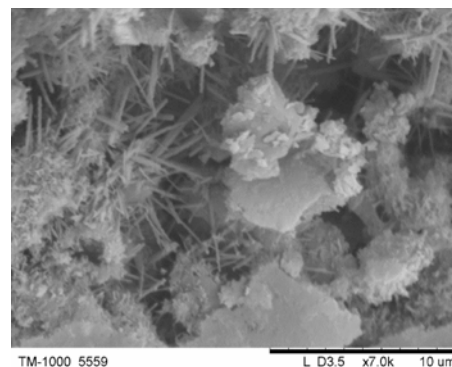


Рис. 4. Микрофотография структуры цементного камня, разрушенного углекислотой и впоследствии подвергнувшегося термопропитке жидкой фазой из ремонтной смеси при ее форсированном разогреве (увеличение в 7000 раз)

Fig. 4. Micrograph of cement stone structure destroyed by carbon dioxide and subsequently subjected to thermal impregnation with liquid phase from repair mixture during its forced heating (magnification of 7000 times)

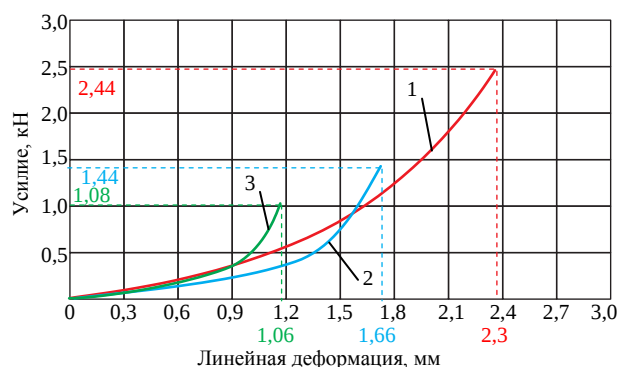


Рис. 5. Зависимость линейных деформаций от усилия растяжения для образцов: 1 – подвергнувшихся термообработке и твердевших без воздействия углекислого газа; 2 – подвергнувшихся термообработке и твердевших в среде углекислого газа; 3 – не подвергнувшихся термообработке и твердевших без воздействия углекислого газа

Fig. 5. Dependence of linear deformations on tensile force for samples: 1 – subjected to heat treatment and hardened without exposure to carbon dioxide; 2 – subjected to heat treatment and hardened in carbon dioxide; 3 – not subjected to heat treatment and hardened without exposure to carbon dioxide

ВЫВОДЫ

1. Исследования структуры цементного камня в поверхностном слое бетонных конструкций, подвергавшихся длительное время воздей-

ствию углекислого газа, показали, что игольчатая структура кристаллов трехкальцевого гидроалюмината и гидроксида кальция в большей или меньшей степени оказывается разрушенной, а когезионная прочность материала существенно уменьшается.

2. Поврежденный коррозией слой не обеспечивает качественного сцепления «старого» бетона с «новым», что служит причиной отслоения бетона восстановления от бетона восстанавливаемой конструкции.

3. Применение форсированного разогрева смеси, укладываемой в контакт с восстанавливаемой конструкцией, вызывает появление температурного градиента до 100 °C/см, что в силу возникающей разницы парциального давления формирует поток жидкой фазы из ремонтной бетонной смеси через систему капилляров поврежденного бетона вглубь восстанавливаемой конструкции. Кристаллизуясь, продукты растворения цемента формируют новую кристаллическую структуру, частично восстанавливая когезионную прочность поврежденного коррозией материала и сращивая бетон восстановления и неповрежденный бетон восстанавливаемой конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rise of Carbon Dioxide Unabated [Electronic Resource]. Mode of access: <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2636/Rise-of-carbon-dioxide-unabated>. Date of access: 04.06.2020.
2. Albaali, G. Carbon Emission Calculations & a Case Study / Ghani Albaali // LAP LAMBERT Verlag. Saarbrücken. 2015. 173 p.
3. EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research [Electronic Resource]. Mode of access: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2020>. Date of access: 14.10.2021.
4. Потенциал природных и техногенных источников диоксида углерода для реализации технологии смешивающегося вытеснения на территории РФ / Н. Г. Глазнов [и др.] // Роснефть. Профессионально о нефти. 2017. Т. 4, № 2. С. 47–52.
5. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П. А. Ребиндер. М.: Наука, 1966. 203 с.
6. Мчедлов-Петросян, О. П. Химия неорганических строительных материалов / О. П. Мчедлов-Петросян. М.: Стройиздат, 1971. 224 с.
7. Мануйлов, Л. А. Физическая химия и химия кремния / Л. А. Мануйлов, Г. И. Ключковский. М.: Высш. шк., 1962. 311 с.
8. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
9. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. Москва: Наука и техника, 1965. 156 с.
10. Молодин, В. В. Форсированный разогрев смеси как фактор увеличения сцепления бетонов, подвергшихся коррозии / В. В. Молодин, А. Е. Ануфриева, А. Х. Навоян // Известия вузов. Строительство. 2020. № 2. С. 56–71. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71>.
11. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель / Е. Е. Шалый [и др.] // Вестник гражданских инженеров. 2018. Т. 68, № 3. С. 123–131. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131>.
12. Навоян, А. Х. Исследование сцепления твердеющего бетона со зрелым при замоноличивании стыков и ремонте конструкций / А. Х. Навоян, В. В. Молодин // Труды НГАСУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 49–61.

Поступила 31.05.2021

Подписана в печать 23.08.2021

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. *Rise of Carbon Dioxide Unabated*. Available at: <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2636/Rise-of-carbon-dioxide-unabated> (Accessed 4 June 2020).
2. Albaali G. (2015) *Carbon Emission Calculations & a Case Study*. LAP LAMBERT Verlag. Saarbrücken. 173.
3. EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research. Available at: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2020> (Accessed 14 October 2021).
4. Glaznov N. G., Dymochkina M. G., Litvak E. I., Vershinina M. V. (2017) Potential of Natural and Man-Made Sources of Carbon Dioxide for the Implementation of the Technology of Mixed Displacement in the Territory of the Russian Federation. *Rosneft. Professionally about Oil*, 4 (2), 47–52 (in Russian).
5. Rebinde P. A. (1966) *Physicochemical Mechanics of Dispersed Structures*. Moscow, Nauka Publ. 203 (in Russian).
6. Mchedlov-Petrosyan O. P. (1971) *Chemistry of Inorganic Building Materials*. Moscow, Stroyizdat Publ. 224 (in Russian).
7. Manuylov L. A., Klyukovskii G. I. (1962) *Physical Chemistry and Silicon Chemistry*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 311 (in Russian).
8. Moskvina V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. I., Guzeev E. A. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete. Methods for their Protection*. Moscow, Stroyizdat Publ. 536 (in Russian).
9. Lykov A. V. (1965) *Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies*. Moscow, Nauka i Tekhnika Publ. 156 (in Russian).
10. Molodin V. V., Anufrieva A. E., Navoyan A. Kh. (2020) Forced Heating of the Mixture as a Factor in Increasing the Adhesion of Corroded Concrete. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (2), 56–71. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71> (in Russian).
11. Shalyi E. E., Leonovich S. N., Kim L. V., Remyantseva V. E., Budrevich N. A. (2018) Combined Effects of Carbonization and Chloride Aggression on Structural Concrete: A Probabilistic Model. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*, 68 (3), 123–131. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131> (in Russian).
12. Navoyan A. Kh., Molodin V. V. (2020) Investigation of the Adhesion of Hardened Concrete with Mature Concrete During Monolithing of Joints and Repair of Structures. *Trudy NGASU [Proceedings of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering – SIBSTRIN]*, 23 (1), 49–61 (in Russian).

Received: 31.05.2021

Accepted: 23.08.2021

Published online: 28.01.2022

Particularities of Exergy Analysis in Air Conditioning Systems

V. I. Prokhorov¹⁾, S. V. Troyanchuk¹⁾, M. A. Razakov^{1, 2)}

¹⁾Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russian Federation),

²⁾Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russian Federation)

© Белорусский национальный технический университет, 2022

Belarusian National Technical University, 2022

Abstract. The paper examines two methods of choosing the initial reference point for exergy of the moist air flow. The first method is characterized by a zero exergy value at the current temperature and humidity of the outdoor air, which are variable both in daily and annual periods. Another is characterized by constant values of parameters of moist indoor air (its temperature and humidity in the room). A comparative study has shown the advantages of the second method: greater stability of values in air processing processes and their convenient presentation on exergy chart. However, it should be noted that this method provides a non-standard technical representation in which the entire energy flow is reduced to zero. The climatic information (temperature and humidity of the outside air) for numerical-analytical experiment has been used from official open sources. The city where the air conditioning system was supposedly installed is Stavropol. The research has been carried out in the summer and cold periods of the year. It is assumed that there are not installed any large heat sources in the room and the main heat sources appeared depending on the period of the year. Additionally, the air conditioning system was equipped with a recirculation line from the serviced room with a mechanical ventilator. The recirculated air entered the mixing chamber in the air conditioning unit which is reducing the consumption of heat energy in the cold season. There are the processes of air conditioning on the Ramzin's h - d -diagram for warm and cold operational modes of air conditioning unit, the air conditioning system under consideration.

Keywords: exergy, exergy chart, h - d -diagram, air conditioning, energy saving, moist air, energy

For citation: Prokhorov V. I., Troyanchuk S. V., Razakov M. A. (2022) Particularities of Exergy Analysis in Air Conditioning Systems. *Science and Technique*. 21 (1), 42–49. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-42-49>

Особенности эксергетического анализа в системах кондиционирования воздуха

Докт. техн. наук, проф. В. И. Прохоров¹⁾, инж. С. В. Троянчук¹⁾, асп. М. А. Разаков^{1, 2)}

¹⁾Московский государственный строительный университет (Москва, Российская Федерация),

²⁾Московский энергетический институт (Москва, Российская Федерация)

Реферат. Исследуются два метода выбора начальной точки отсчета эксергии потока влажного воздуха. Первый характеризуется нулевым значением эксергии при текущей температуре и влажности наружного воздуха, которые изменяются как в суточные, так и в годовые периоды, другой – постоянными значениями параметров влажного внутреннего воздуха (его температуры и влажности в помещении). Сравнительное исследование показало преимущества второго метода: большую стабильность значений в процессах обработки воздуха и удобное их представление на эксергетической диаграмме. Однако следует отметить, что данный метод дает нестандартное техническое представление, в котором весь поток энергии сводится к нулю. Для численно-аналитического эксперимента использовали климатические данные (температуру и влажность наружного воздуха) из официальных открытых источников. Город, где предположительно была установлена система кондиционирования воздуха, – Ставрополь. Проведение исследований осуществлялось в летний и холодный периоды года. Принимали, что в помещении нет крупных источников теплоты, а основные из них появлялись в зависимости от периода года. Дополнительно система кондиционирования

Адрес для переписки

Разаков Мухаммет Азатович
Московский энергетический институт
ул. Красноказарменная, 14,
111250, г. Москва, Российская Федерация
Тел.: +7 495 362-70-01
muhammet@nlm.ru

Address for correspondence

Razakov Muchammet A.
Moscow Power Engineering Institute
14, Krasnokazarmennaya str.,
111250, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 495 362-70-01
muhammet@nlm.ru

воздуха оборудовалась рециркуляционной линией из обслуживаемого помещения с механическим побуждением. Рециркуляционный воздух попадал в камеру смешения в приточной установке, тем самым обеспечивая сокращение расхода тепловой энергии в холодный период года. Приведены процессы обработки воздуха на h - d -диаграмме Рамзина для теплого и холодного режимов работы приточной установки, рассматриваемой системы кондиционирования воздуха.

Ключевые слова: эксергия, диаграмма эксергии, h - d -диаграмма, кондиционирование воздуха, энергосбережение, влажный воздух, энергия

Для цитирования: Прохоров, В. И. Особенности эксергетического анализа в системах кондиционирования воздуха / В. И. Прохоров, С. В. Троянчук, М. А. Разаков // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 42–49. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-42-49>

Introduction

As a rule, the analysis of energy parameters of air conditioning systems is carried out using the balance method, taking into account only the first law of thermodynamics. The drawback of this method is that it does not differentiate types of energy and their energy value in relation to the environment. The very concept of the environment is hidden in the analysis, and the strengths and weaknesses of individual processes and sectors of the energy-consuming system are not disclosed. Therefore, the method of thermodynamic analysis using the concept of exergy (a workable part of energy) has, in our opinion, insufficiently employed reserves.

The classical development of the exergy method of thermodynamic analysis was commenced in the end of the XIX century (A. Stodola, L. Guye) and continued during the entire twentieth century (Z. Rant, Ya. Shargut, R. Petela, V. M. Brodyansky, V. S. Martynovsky, S. S. Dolinsky and others).

The exergy method of thermodynamic analysis is based both on the first and the second laws of thermodynamics and allows to take into account the quality of energy in terms of obtaining a useful effect under specific environment conditions (t and d) [1–4]. Based on the evaluation of purely physical processes, the exergy method allows to find the most important areas of application of energy-saving engineering [5–8] and to define new technical requirements for air conditioning systems ensuring their “innovative” development [9]. At the moment, the method under consideration has found application in many branches of industry [10–12].

Although the state of the system with the minimum potential difference relative to the environment has traditionally been selected as the reference point for exergy, this choice is complicated

in case of air conditioning systems because there is no stability of environment conditions [13–15] and the value of exergy increment of air flow is sign-variable.

Methods of exergy efficiency assessment

Efficiency of major units of air conditioning installation. While attempting to assess the efficiency of the air conditioner unit, it is necessary to correlate the exergy difference of the moist air flow (useful effect in this unit or device) with the exergy expenditures, which include exergy differences of heat transfer medium, mass transfer, electrical capacity of pump drives, ventilators or other means for creating differential air pressure in the conditioner units or in the ductworks.

Formation of the exergy balance in the mixing chamber can result in the following expression:

$$E_R + G_r + E_O G_I = (G_I + G_r) E_M, \quad (1)$$

where E_R – exergy of the moist air flow in the room; G_r – mass flow of the recirculated air; E_O – exergy of the moist outdoor air flow; G_I – mass flow of the inlet air; E_M – exergy of the air flow mixture.

After simple algebraic transformations and with regard to the zero reference level of exergy, introduced earlier

$$G_r E_M = (E_O - E_M) G_I. \quad (2)$$

The right-hand member expresses the useful effect of the process of air flows mixing, and the left-hand member expresses the expended air exergy. Taking into account the expenditures of the electrical energy, it is possible to formulate the exergetic efficiency factor for the mixing chamber in the winter season in the form of the following expression:

$$\bar{e}_{\text{mixing chamber}} = \frac{G_I(E_O - E_M)}{G_r E_M + N_r G_r + N_5(G_r + G_I)}, \quad (3)$$

where N_r – energy expended by the recirculating ventilator; N_5 – amount of energy of the suction ventilator expended on the overcoming of aerodynamic resistance of the air mixing chamber.

The notation should be introduced $G_r/G_I = a$. Then the exergy efficiency factor for the mixing chamber may be written as follows:

$$\bar{e}_{\text{mixing chamber}} = \frac{E_O - E_M}{aE_M + aN_r + N_5(1+a)}, \quad (4)$$

where a – ratio between G_r and G_I .

In the summer season (due to the heating of air in the recirculating duct) the expression (4) will be written as follows:

$$\bar{e}_{\text{mixing chamber}} = \frac{E_O - E_M}{a(E_M - E_R)' + aN_r + N_5(1+a)}. \quad (4')$$

The air heater efficiency is the ratio of the air exergy change to the change of heat transfer medium exergy and the expended electrical energy

$$\bar{e}_{\text{calorifier}} = \frac{\Delta E_{\text{air}}}{\Delta E_{\text{heat transfer med}} + N_{2,4}}, \quad (5)$$

where ΔE_{air} – difference between exergy of air flow mixture and air before air washer; $\Delta E_{\text{heat transfer med}}$ – the change of heat transfer medium exergy; $N_{2,4}$ – expended electrical energy ensuring the operation of this unit.

The air washer efficiency is the ratio of the air exergy difference in this unit to the change of water exergy and the expended electrical energy

$$\bar{e}_{\text{air washer}} = \frac{\Delta E_{\text{air}(1)}}{\Delta E_{\text{water}} + N_3}, \quad (6)$$

where $\Delta E_{\text{air}(1)}$ – difference between exergy of air after air washer and air before air washer; ΔE_{water} – the change of water exergy; N_3 – aggregate expenditures of electrical energy of pumps, ventilators, and other devices ensuring the operation of this unit.

Exergy efficiency of the air conditioning system. The efficiency of the air conditioning system in a simplified form can be assessed by the correlation of the change in the inlet air exergy (conditioning process, which is useful, assimilating heat-

and-moisture excesses in the room) with the change of exergy immediately after the ingress of air in the air conditioning installation until the exit of air from it.

The simplified analytical expression of the efficiency is written as follows:

$$\bar{e} = \frac{E_I - E_R}{E_O - E_I}, \quad (7)$$

where E_I – exergy of the moist air flow at the entrance to the room.

Taking into consideration the zero level of exergy, taken in this paper as $E_R = 0$:

$$\bar{e} = \frac{E_I}{E_O - E_I}; \quad (8)$$

$$\bar{e} = \frac{|\Delta E_1|}{|\Delta E_2| + |\Delta E_3| + |\Delta E_4| + |\Delta E_5|}. \quad (9)$$

As the reference level of exergy, taken by us, is constant, there is no need to recalculate all the values of the flow exergy in the context of the change in the outdoor air parameters, only the E_{in} or ΔE_5 should be recounted.

With regard to expressions (4), (4'), (5) and (6) the exergy efficiency of the air conditioning system can be represented as a chart (Fig. 1), where values of expended exergy are singled out on the X-axis, and values of useful exergy are singled out on the Y-axis.

In the summer season the preheating air heater is turned off, however, it creates the aerodynamic resistance to the movement of the air flow. Thus, N'_4 expresses the fraction of the electrical energy of the ventilator, required for the overcoming of the aerodynamic resistance of the turned off air heater. The aggregate expenditures of the electrical energy by the ventilator can be written as follows:

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 = N_R, \quad (10)$$

where N_1 – expenditure of electrical energy of the ventilator on the overcoming of the aerodynamic resistance of the ductwork (authors decided not to include this expenditure due to its extremely specific calculation); N_2, N_3, N_4, N_5 – expenditures of the electrical energy of the ventilator on the overcoming of the aerodynamic resistance of the reheat air heater, air washer, preheating air heater and mixing chamber.

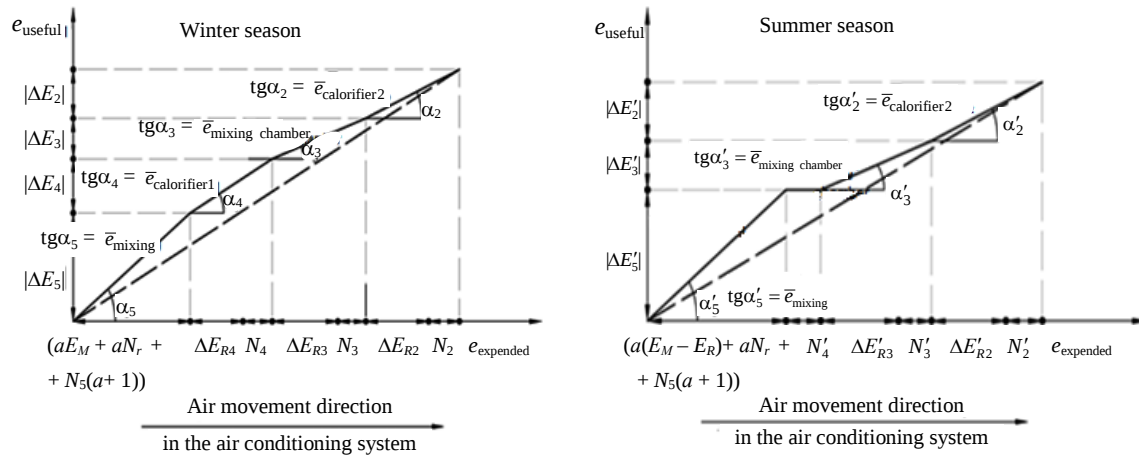


Fig. 1. Graphical determination of the air conditioning system efficiency

The results from expressions (4), (4'), (5) and (6), as well as Fig. 1 that in order to increase the exergy efficiency of the air conditioning system it is necessary to reduce the amount of the expended electrical energy. It can be achieved by the reduction of aerodynamic resistances of units of the air conditioning system, hydraulic resistances in the air washer, optimization of the ventilator performance. This analysis is most appropriate to be conducted precisely when selecting the zero reference point of exergy in the attended room, since this makes it convenient to graphically and analytically depict the exergy efficiency of the air conditioning system.

Results and discussion.

Rationale for introduction of the new reference point for exergy

Depending on the area of construction, the average daily temperature difference can exceed 10 °C, and the average annual temperature can exceed 50 °C. Relative humidity varies

from 20 to 100 %. Such an amplitude of temperature and humidity fluctuations leads to inconvenience in calculating the exergy efficiency of systems and equipment for creating a given air-thermal microclimate. It is also difficult to compare effectiveness of the different versions of systems. It has been considered the change in state of the Stavropol climate region. There are the climatic data from official open sources in Fig. 2, 3.

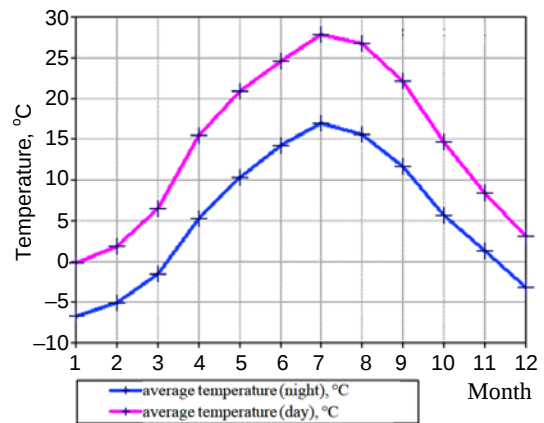


Fig. 2. Averaged climate data for Stavropol

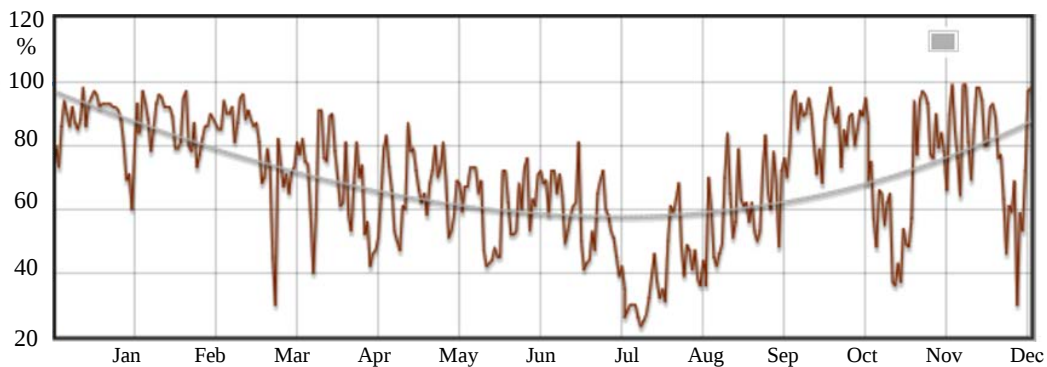


Fig. 3. Chart of the average annual relative humidity outdoor air for Stavropol

In general terms, the effect of changing the parameters of exergy reference point can be shown in the h - S -diagram (Fig. 4).

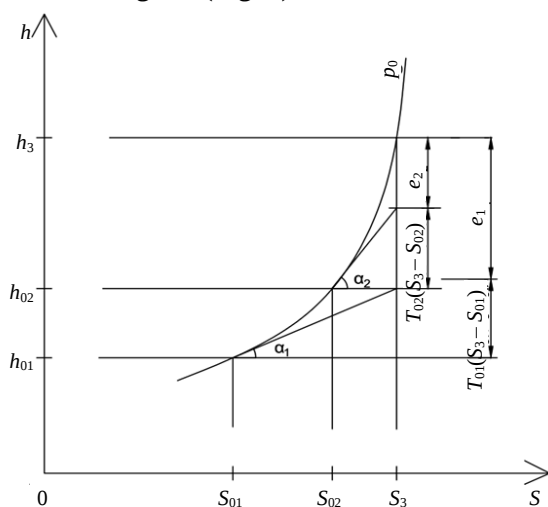


Fig. 4. Change of the outdoor air exergy value through changes in climatic parameters

In general terms, according to the definition of the exergy of flow:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{c_p (T_3 - T_{01}) - T_{01} (S_3 - S_{01})}{c_p (T_3 - T_{02}) - T_{02} (S_3 - S_{02})} \neq 1, \quad (11)$$

where e_1 – exergy of the lower limit of the amplitude of fluctuation of temperature or humidity, kJ/kg; e_2 – exergy of the upper limit of the amplitude of fluctuation of temperature or humidity, kJ/kg; c_p – heat capacity of moist air at constant pressure, kJ/(kg·K); T_3 – temperature of the flow of moist air, K; T_{01} – ambient temperature of the lower limit of the amplitude of climate fluctuation ($\text{tg}\alpha_1$), K; T_{02} – ambient temperature of the upper limit of the amplitude of climate fluctuation ($\text{tg}\alpha_2$), K; S_3 – entropy of the flow of moist air, kJ/kg; S_{01} – entropy of the environment of the lower limit of the amplitude of fluctuation of climate parameters, kJ/kg; S_{02} – entropy of the environment of the upper limit of the amplitude of climate fluctuation, kJ/kg.

Thus, it follows from expression (11) that the same flow of moist air has a different exergy value due to a change in parameters of the exergy reference point. We will determine within what limits this change in exergy can be wrong. Exergy of a moist air flow (e_{air}) is calculated by the formula from the publication [16]:

$$e_{air} = T_0 \left\{ \left(\frac{T_x}{T_0} - 1 - \ln \frac{T_x}{T_0} \right) (c_p + d_x c_{p,air}) + R_{air} \left((0,622 + d_x) \ln \frac{(0,622 + d_0) p_x}{(0,622 + d_x) p_0} + d_x \ln \frac{d_x}{d_0} \right) \right\}, \quad (12)$$

where e_{air} – exergy of a moist air flow; T_x – temperature of the flow of moist air, K; T_0 – ambient temperature, K; d_x – moisture content of the flow of moist air, kg/kg; $c_{p,air}$ – isobaric heat capacity, J/(kg·°C); R_{air} – universal gas constant for dry air, J/(K·mol); d_0 – moisture content of the environment, kg/kg; p_x – pressure of moist air in the flow, Pa; p_0 – atmospheric pressure of the environment, Pa.

Using formula (2), we will calculate the exergy of the flow relative to the extreme values of fluctuation of characteristics of moist air and compare with the exergy relative to the constant indoor parameters (e_0). To do this, let us set a flow of moist air with the parameters: $t = 30^\circ\text{C}$, $\varphi = 60\%$. When using the exergy analysis in air conditioning systems, it is necessary to choose not only the temperature but also a representative value of humidity in the room which is constant and ensures comfortable conditions for people. The results of calculations with the selected parameters are summarized in Tab. 1.

Table 1
Value of exergy of a flow of moist air relative to the extreme points of fluctuation in climate and air parameters in the room

Season	Summer		Winter		Air parameters in the room
Time of day	Night	Day	Night	Day	
$t, ^\circ\text{C}$	17	27	-7	0	20
$d, \text{g/kg, dry air}$	9.668	8.889	1.773	3.000	7.260
$\varphi, \%$	80	40	80	80	50
$e, \text{kJ/kg}$	0.520	0.332	5.000	3.320	0.697
e/e_0	0.75	0.48	7.17	4.76	1.00

Tab. 1 shows that ratio e/e_0 ranges from 0.48 to 7.17. The above data indicate that it is necessary to carefully justify the choice of the reference point in open systems. According to the authors, the internal air environment of a building with air parameters maintained at an almost constant heat and humidity level (Fig. 5) can be used as the possible definition of the zero level of exergy.

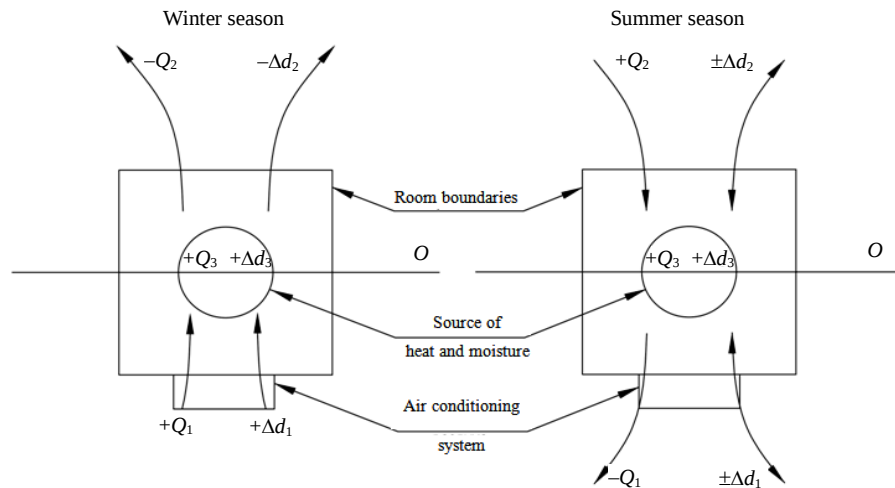


Fig. 5. Representation of heat and moisture balances in the room during summer and winter seasons

Fig. 5 uses the following notation: Q_1 , Δd_1 – heat and moisture transport realized by the air conditioning system; Q_2 , Δd_2 – heat and mass exchange of the room with the environment (heat input, heat loss and moisture penetration during summer or winter season); Q_3 , Δd_3 – excess heat and moisture inside the room during winter or summer.

This constancy of internal parameters is achieved by the operation of heating, ventilation and air conditioning systems. The operation of one of the simplest air conditioning systems [17–19] (Fig. 6) for the summer and winter seasons on the basis of the entered exergy reference point can be represented by the diagram shown in Fig. 7. Fig. 6, 7 uses the following notation: O (O') – parameters of outdoor air during winter (summer) season; M (M') – air parameters at the outlet from the mixing chamber during winter (summer) season; C – air parameters at the outlet from the preheating calorifier; W – air parameters at the outlet from the air washer; I – air parameters at the outlet from the reheat calorifier (inlet air); R – air parameters in the room; R' – air parameters in the recirculation air duct (it is assumed that the process $R-R'$ goes along $d = \text{const}$, that is, the temperature gradient in the room is not taken into account; since the air intake for recirculation comes from the working area of the room, when accounting for it the process $R-R'$ goes along $\varepsilon = \text{const}$); E_{inlet} – exergy of the inlet air flow; ΔE_1 ($\Delta E'_1$) – variation of exergy of the moist air flow (the process of its conditioning) during winter (summer)

season; ΔE_2 ($\Delta E'_2$) – variation of exergy of the moist air flow in the reheat air heater during winter (summer) season; ΔE_3 ($\Delta E'_3$) – variation of exergy of the moist air flow in the humidifier during winter (summer) season; ΔE_4 – variation of exergy of the flow of moist air in the preheating air heater ($\Delta E'_4$ – turned off during summer season, but creates aerodynamic drag); ΔE_5 ($\Delta E'_5$) – variation of exergy of the moist air flow in the mixing chamber during winter (summer) season.

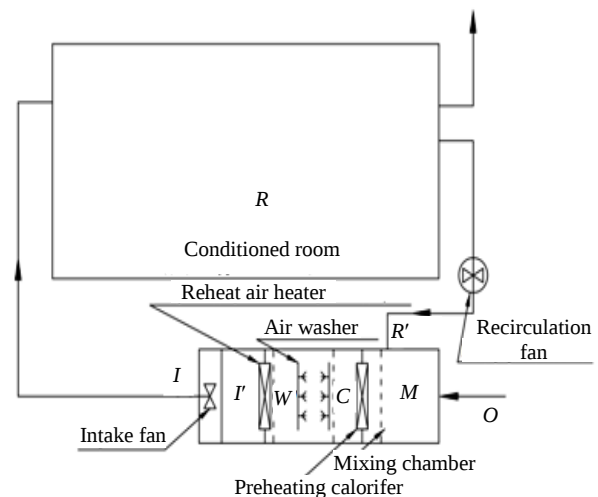


Fig. 6. Schematic diagram of air conditioning during winter season with the recirculation (before heater)

Representation of the process of heat and moisture treatment of the inlet air in the $h-d$ -diagram is shown in Fig. 8, 9 [20].

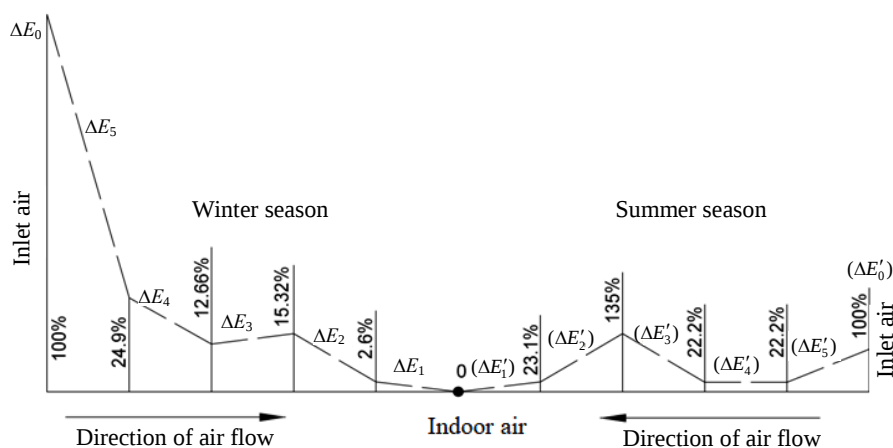


Fig. 7. Diagram of moist air flow exergy variation

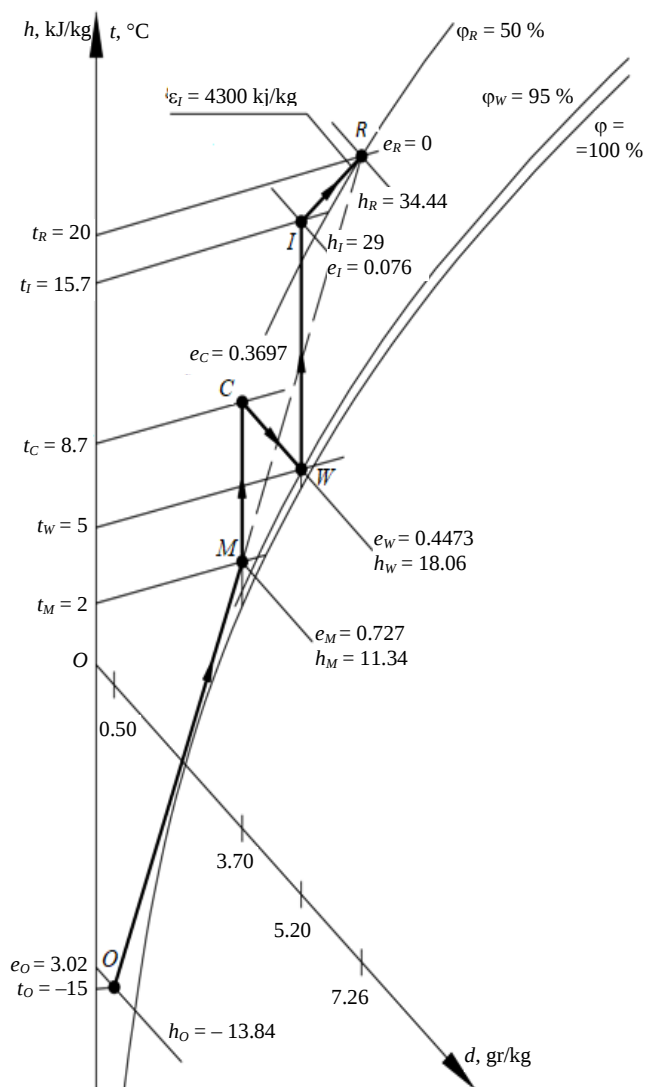


Fig. 8. Representing the process of air conditioning during winter season with recirculation in the h - d -diagram

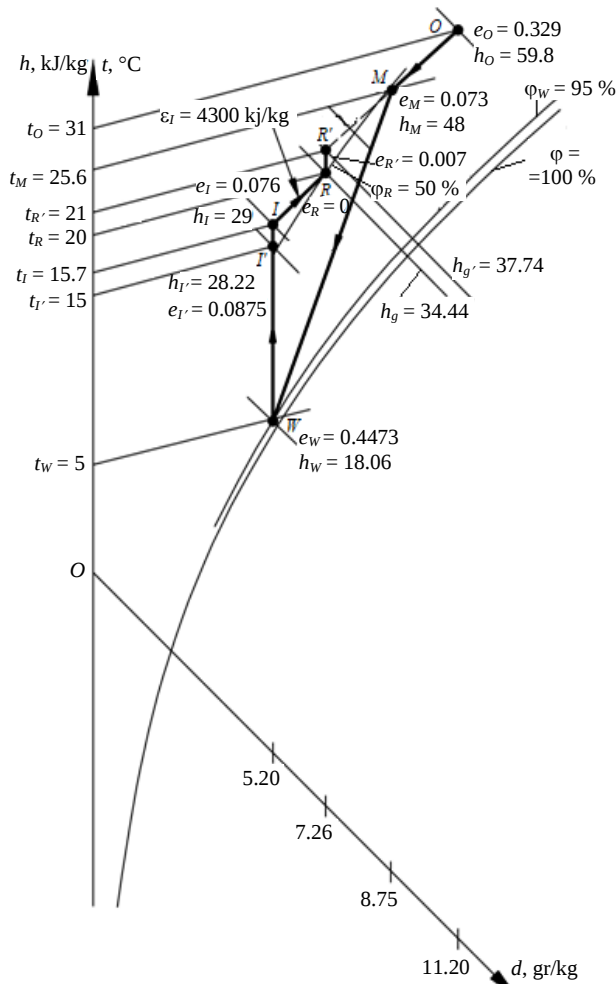


Fig. 9. Representing the process of air conditioning during summer season with the recirculation and second heating in the h - d -diagram

CONCLUSIONS

1. The proposed reference level of the exergy has a number of advantages in comparison with the variable reference point according to the outdoor air parameters. The most important advantage is the greater stability of the values and marks of the air exergy flow. This fact makes it possible to simplify the calculations of the efficiency of the air conditioning installation as well as its units. Also, the reference level of exergy proposed in this paper is close in its parameters to the commonly applied parameters of the so-called “technical” atmosphere and allows building a new diagram of the change in the exergy of the flow in the air conditioning system.

2. The analysis shows that the increase in the exergy efficiency of the air conditioning system and its units depends primarily on the reduction in expenditures of electrical energy and optimization of processes in the heat-and-mass exchange apparatus of air handling. First of all, it concerns such units as the mixing chamber and the air washer.

REFERENCES

1. Brodyansky V. M. (1973) *Exergy Method of Thermodynamical Analyses*. Moscow, Energiya Publ. 296 (in Russian).
2. Shukuya M. (2013) *Exergy: Theory and Applications in the Built Environment*. Springer. 374. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4573-8>.
3. Dincer I., Rosen M. A. (2013) *Exergy. Energy, Environment and Sustainable Development*. 2nd ed. Elsevier. 552. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68369-6>.
4. Dincer I., Rosen M. A. (2011) *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd. 621. <https://doi.org/10.1002/9780470970751>.
5. Baldi M. G., Leoncini L. (2014) Thermal Exergy Analysis of a Building. *Energy Procedia*, 62, 723–732. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.436>.
6. Gendelis S., Jakovičs A., Bandeniece L. (2015) Experimental Research of Thermal Comfort Conditions in Small Test Buildings with Different Types of Heating. *Energy Procedia*, 78, 2929–2934. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.669>.
7. Ahmad M. W., Moursheda M., Mundowb D., Sisinni M., Rezgui Y. (2016) Building Energy Metering and Environmental Monitoring – a State-of-the-Art Review and Directions for Future Research. *Energy and Buildings*, 120, 85–102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.059>.
8. Nasutiona H., Sumerub K., Aziza A. A., Senawib M. Y. (2014) Experimental Study of Air Conditioning Control System for Building Energy Saving. *Energy Procedia*, 61, 63–66. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.907>.
9. Luo Q., Yanga L., Liu N. X., Xia J. (2015) Comparative Study on Thermal Environment and Energy Consumption of Urban Residential Houses in Beijing. *Procedia Engineering*, 121, 2141–2148. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.085>.
10. Baldi M. G., Leoncini L. (2015) Effect of Reference State Characteristics on the Thermal Exergy Analysis of a Building. *Energy Procedia*, 83, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.208>.
11. Zhou X., Li N., Zou J. (2015) Research on Energy-Saving of New Type Low-Temperature Air Flow Dehumidification System Based on Exergy Analysis Method. *Procedia Engineering*, 121, 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1068>.
12. Vilarinho A. N., Campos J. B. L. M., Pinho C. (2016) Energy and Exergy Analysis of an Aromatics Plant. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.06.003>.
13. *Meteo Info*. (2017) Available at: <http://www.meteoinfo.ru> (in Russian).
14. *Weather Atlas*. (2017) Available at: http://www.atlas-yakutia.ru/weather/hum/climate_russia-III_hum.html (in Russian).
15. Xu W. H., Li Q. X., Yang S., Xu Y. (2014) Overview of Global Monthly Surface Temperature Data in the Past Century and Preliminary Integration. *Advances in Climate Change Research*, 5, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2014.11.003>.
16. Prokhorov V. I., Shilkloper S. M. (1981) Method of Calculation of Exergy Flow of Moist Air. *Kholodilnaya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (9), 37–40 (in Russian).
17. Minkin M. S., Kuimov D. N., Lukyanov A. D. (2016) Development of the Energy-Saving Air Regeneration System in Production Rooms. *Procedia Engineering*, 150, 1353–1358. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.327>.
18. Sukhodub I. O., Deshko V. I. (2014) Exergy Analysis of Ventilation Systems with Energy Recovery. *Magazine of Civil Engineering*, 2 (46), 36–46.
19. Titova E. M., Averyanova O. V. (2011) Efficiency Evaluating of Air Conditioning System with Air Dehumidification Section. *Magazine of Civil Engineering*, 1 (19), 46–52.
20. Nesterenko A. V. (1971) *Fundamentals in Thermodynamic Calculations of Ventilation and Air Conditioning*. Moscow, Vishaya Shkola Publ. 460 (in Russian).

Received: 24.12.2019

Accepted: 04.10.2021

Published online: 28.01.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-50-56>

УДК 692.415

Предложения по реабилитации эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель

Канд. техн. наук, проф. В. Н. Черноиван¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты Н. В. Черноиван¹⁾, А. В. Торхова¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Совмещенные утепленные рулонные кровли, все слои которых последовательно уложены на несущую конструкцию и покрыты водоизоляционным ковром, составляют более 80 % кровель жилых и общественных эксплуатируемых и возводимых зданий. Столь значительное количество сооружений с совмещенной рулонной кровлей в Республике Беларусь обусловлено тем, что в начале 70-х гг. прошлого века в Советском Союзе стартовала программа по развитию полносборного жилищного строительства. Как показала практика, уже по истечении трех-пяти лет эксплуатации совмещенные утепленные рулонные кровли нуждались в текущем ремонте – ликвидации протечек. Ремонт в основном сводился к наклейке дополнительных слоев рулонного водоизоляционного материала на участках протечек кровли. Натурные исследования позволили установить причины, почему менее чем через 10–12 лет эксплуатации совмещенным утепленным рулонным кровлям необходим капитальный ремонт. Анализ результатов наблюдений показал, что основным фактором, влияющим на выход кровли из строя, является высокая влажность материала утеплителя. Главная причина увлажнения материала теплоизоляционного слоя в процессе эксплуатации кровли – разрушение слоя пароизоляции. Базируясь на результатах выполненных натурных исследований и на положениях нормативных документов Республики Беларусь, авторы предлагают конструктивное решение и технологию производства работ для реабилитации эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель. Основные преимущества данного решения – обеспечение любого термического сопротивления теплопередаче совмещенного покрытия без демонтажа конструктивных элементов существующей кровли; применение в качестве водоизоляционного ковра ПВХ-мембран, что позволит без дополнительных затрат в течение 20 лет эксплуатации исключить протечки кровли.

Ключевые слова: сопротивление теплопередаче, совмещенное покрытие, деструкция (разрушение) битумного вяжущего, протечки кровли, защитная посыпка, ремонт, рулонный водоизоляционный ковер, ПВХ-мембрана

Для цитирования: Черноиван, В. Н. Предложения по реабилитации эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель / В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван, А. В. Торхова // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 50–56. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-50-56>

Proposals for Rehabilitation of Operated Combined Insulated Rolled Roofs

V. N. Chernoiivan¹⁾, N. V. Chernoiivan¹⁾, A. V. Torkhova¹⁾

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

Abstract. Combined insulated rolled roofs, all layers of which are sequentially laid on the supporting structure and covered with a waterproof carpet, make up more than 80 % of the roofs of residential and public buildings in operation and under construction. Such a significant number of structures with a combined roll roofing in the Republic of Belarus is due to the fact that in the early 70s of the last century, a program for the development of prefabricated housing was launched in the Soviet Union. As practice has shown, after three to five years of operation, the combined insulated roll roofs needed current repairs – to eliminate leaks. The repair basically boiled down to the gluing of additional layers of rolled waterproofing material in the areas of roof leaks. Field studies have allowed us to establish the reasons why, in less than 10–12 years of operation, the combined insulated rolled roofs need major repairs. The analysis of the results of field studies has shown that the main factor affecting the failure of the roof is the high humidity of the insulation material. The main reason for moistening the material of the thermal insulation layer during the operation of the roof is the destruction of the vapor barrier layer. Based on the results of the performed field studies and regulatory documents of the Republic of Belarus, the authors of the publication offer a constructive solution and technology of work for the rehabilitation of operated combined insulated rolled roofs. The main

Адрес для переписки

Черноиван Вячеслав Николаевич
Брестский государственный технический университет
ул. Московская, 267,
224017, г. Брест, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 526-53-46
vnchernoiivan@list.ru

Address for correspondence

Chernoiivan Vyacheslav N.
Brest State Technical University
267, Moskovskaya str.,
224017, Brest, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 526-53-46
vnchernoiivan@list.ru

advantages of the proposed solution are: provision of any thermal resistance to heat transfer of the combined coating without dismantling the structural elements of the existing roof; use of PVC membranes as a water-insulating carpet, which will allow to eliminate roof leaks within 20 years of operation without additional costs.

Keywords: heat transfer resistance, combined coating, destruction (decay) of bituminous binder, roof leaks, protective sprinkling, repair, rolled water-insulating carpet, PVC-membrane

For citation: Chernoiivan V. N., Chernoiivan N. V., Torkhova A. V. (2022) Proposals for Rehabilitation of Operated Combined Insulated Rolled Roofs. *Science and Technique*. 21 (1), 50–56. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-50-56> (in Russian)

Введение

Совмещенные утепленные рулонные кровли, все слои которых последовательно уложены на несущую конструкцию и покрыты водоизоляционным ковром, составляют более 80 % кровель жилых и общественных эксплуатируемых и возводимых зданий. Столь значительное количество сооружений с совмещенной рулонной кровлей в Республике Беларусь обусловлено тем, что в начале 70-х гг. прошлого века в СССР стартовала программа по развитию полносборного жилищного строительства. Основными аргументами программы в пользу массового применения совмещенных утепленных рулонных кровель при новом строительстве были:

- повсеместно налаженное промышленное изготовление многопустотного настила из сборного железобетона;

- существенная (более чем на 15 %) экономия материальных и трудовых ресурсов по сравнению с чердачными крышами;

- сравнительно простая (по сравнению со скатными крышами) технология возведения.

Однако, как показала практика, уже по истечении трех-пяти лет эксплуатации совмещенные утепленные рулонные кровли нуждались в текущем ремонте – ликвидации протечек. Этот ремонт в основном сводился к наклейке дополнительных слоев рулонного водоизоляционного материала на участках протечек кровли [1]. Следует отметить, что менее чем через 10–12 лет эксплуатации такие кровли требовали капитального ремонта [2, 3].

Результаты натурных обследований технического состояния эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель [1, 4] позволили сделать вывод, что основные причины, приводящие к появлению в них протечек, таковы:

- деструкция (разрушение) битумного вяжущего водоизоляционного ковра от ультра-

фиолетового (УФ) излучения на участках кровли, где отсутствует защитный слой;

- появление и разрыв воздушных мешков кровельного рулонного ковра в результате увеличения влажности материала теплоизоляционного слоя в процессе эксплуатации кровли.

Сегодня проблема снижения разрушительного воздействия УФ-излучения на рулонный водоизоляционный материал на битумной мастике решается за счет применения защитных посыпок. Однако, как показали натурные исследования, в течение пяти-шести лет эксплуатации совмещенных кровель слой защитной заводской посыпки на участках с большими уклонами (у водоприемных воронок) практически полностью разрушается. Исследованиями установлено, что основная причина снижения сопротивления теплопередаче и появления протечек в совмещенных утепленных рулонных кровлях – увлажнение материала теплоизоляционного слоя в процессе их эксплуатации [5, 6].

Натурные исследования [1, 7, 8] показали, что по истечении 8–12 лет эксплуатации влажность утеплителя в кровлях увеличилась в 2,5–5 раз по сравнению со значениями, установленными в [9]. При этом коэффициент теплопроводности материала утеплителя возрастал более чем на 30 %, что и привело к уменьшению сопротивления теплопередаче совмещенного покрытия в целом.

Установлено, что свободная влага, находящаяся в увлажненном утеплителе рулонной кровли, тоже оказывает влияние на разрушение слоев водоизоляционного ковра. В летний период, когда температура на наружной поверхности водоизоляционного ковра достигает (70–80) °С, свободная влага превращается в пар и, увеличиваясь в объеме в 15–40 раз, приводит к появлению вздутий и воздушных мешков на кровле. Основные причины возникновения вздутий и воздушных мешков в слоях рулонного кровельного ковра – нарушение тех-

нологии производства работ (например, наклейка водоизоляционного ковра при высокой влажности наружного воздуха), а также высокое сопротивление паропрооницанию водоизоляционных рулонных материалов на основе битума.

Циклические (часовые, суточные) колебания температуры на поверхности водоизоляционного ковра вызывают циклические воздействия (деформации) в его слоях, что приводит к появлению микротрещин в рулонном водоизоляционном материале (битуме) и, как следствие, к протечкам кровель. Устранение протечек рулонной кровли – трудоемкий технологический процесс, включающий: демонтаж поврежденного рулонного ковра, замену или просушивание слоя увлажненного материала утеплителя, устройство заплат в местах разрывов рулонов [10, 11].

Учитывая, что протечки кровли из всех конструктивных дефектов, возникающих при эксплуатации зданий и сооружений, создают наибольший дискомфорт для владельцев помещений и наносят ощутимый материальный ущерб, можно сделать вывод, что разработка технологии реабилитации эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель без их капитального ремонта (демонтажа существующих слоев) – весьма актуальная проблема.

Натурные исследования технического состояния совмещенных утепленных рулонных кровель

Для получения достоверной информации о техническом состоянии материалов, составляющих конструкцию эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель с прямым размещением слоев, разработана методика и выполнены натурные исследования с учетом нормативных документов [12, 13]. Это позволило выявить основные дефекты в материалах, из которых состоит конструкция кровли.

Верхний слой водоизоляционного ковра имел следующие значимые дефекты. Защитная заводская посыпка на участках кровли с большими уклонами (у водоприемных воронок) практически полностью была разрушена (рис. 1а). Отсутствие защитной посыпки привело к разрушению (деструкции) битума от воздействия УФ-излучения и появлению протечек кровли (рис. 1б).

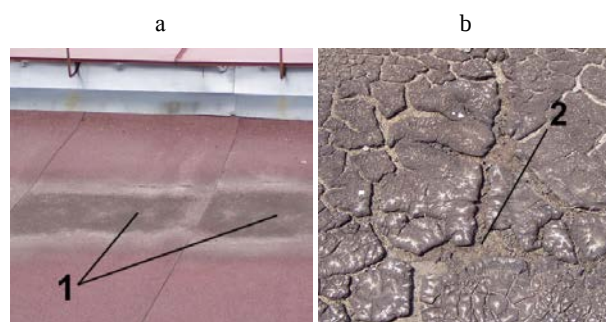


Рис. 1. Техническое состояние эксплуатируемого верхнего слоя рулонного водоизоляционного ковра: а – с заводской защитной посыпкой; б – без защитной посыпки;

1 – участки с полностью разрушенным слоем защитной посыпки; 2 – разрушенное битумное покрытие

Fig. 1. Technical condition of operated top layer of rolled water-insulating carpet: а – with factory protective sprinkling; б – without protective sprinkling;

1 – sections with completely destroyed layer of protective sprinkling; 2 – destroyed bitumen coating

Техническое состояние выравнивающей стяжки практически на всех обследованных кровлях находилось в удовлетворительном состоянии. Фактические показатели сопротивления теплопередаче $R_{\text{фак}}$ совмещенных покрытий, не имеющих протечек кровли, не превышали $1,5 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, что на 30 % меньше значения, заложенного при проектировании объекта, и в четыре раза меньше $R_{\text{норм}} = 6,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ [9].

Лабораторные исследования проб материалов утеплителя, взятых из кровель без протечек, показали, что влажность утеплителя в процессе эксплуатации кровли увеличилась в 3–5 раз по сравнению со значениями, установленными в [9]. Коэффициент теплопроводности материала утеплителя возрос почти на 40 %.

Следовательно, можно сделать вывод, что после пяти-восьми лет эксплуатации пароизоляции на основе битумной мастики разрушается [14]. И, учитывая, что в процессе эксплуатации зданий за счет осадочных деформаций раствор в стыках между плитами покрытия рассыпается, в образовавшиеся зазоры на участках с разрушенной пароизоляцией из помещений поступает влажный воздух, который и приводит к постоянному увлажнению слоя теплоизоляции. Выполненные натурные исследования показали, что в течение каждого года эксплуатации кровли влажность утеплителя увеличивается минимум на 1 % [15]. Также установлено,

что пароизоляция на участках стыков плит покрытия находилась в нерабочем состоянии – разрушения составляли от 60 до 80 % площади стыков.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты натурных исследований [1, 4, 5, 7, 14] показали, что основной причиной, влияющей на динамику накопления влаги в слое теплоизоляции при эксплуатации совмещенных утепленных рулонных кровель с последовательным размещением слоев, является разрушение слоя пароизоляции. Сегодня для выполнения работ по его восстановлению необходимо демонтировать все вышележащие слои кровли: водоизоляционный ковер, выравнивающую стяжку, теплоизоляцию, т. е. полный демонтаж существующей кровли. Это очень трудоемкий технологический процесс.

Согласно расчетам, трудоемкость демонтажа 10 м² площади всех слоев кровли составляет более 150 чел.·ч [10, 11]. Следовательно, разработка эффективной технологии производства работ по капитальному ремонту эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель – актуальная задача. Анализ рекомендуемых для массового применения конструктивных решений таких кровель позволяет сделать вывод, что в качестве базы для разработки эффективной технологии капитального ремонта целесообразно принять конструкцию инверсионной кровли [12].

Реабилитация совмещенных утепленных рулонных кровель

Для выполнения реабилитации эксплуатируемой совмещенной утепленной рулонной кровли авторы статьи предлагают следующее конструктивное решение (рис. 2), которое позволит исключить самый трудоемкий технологический процесс – демонтаж существующей кровли. Рекомендуемое решение аналогично конструкции инверсионной кровли. Отличие лишь в том, что в предлагаемом варианте роль пароизоляции будут выполнять отремонтированные слои существующего водоизоляционного ковра (уложенного на несущую конструкцию), к которому будет крепиться плитный утеплитель.

Для исключения негативного влияния УФ-излучения на водоизоляционный ковер и появления вздутий (воздушных мешков) новый водоизоляционный ковер рекомендуется делать из ПВХ-мембраны. Предлагается выполнить утепление существующей кровли плитным утеплителем с последующим закреплением по нему водоизоляционного ковра из ПВХ-мембраны (рис. 2). Для снижения нагрузки на существующие несущие конструкции покрытия рекомендуется в качестве дополнительной теплоизоляции использовать негорючие минераловатные плитные утеплители, поверх которых ПВХ-мембрана будет крепиться без устройства выравнивающей стяжки.

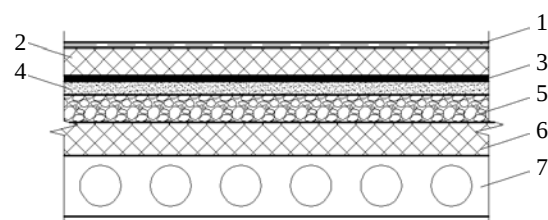


Рис. 2. Рекомендуемое конструктивное решение кровли для выполнения реабилитации: 1 – водоизоляционный ковер из ПВХ-мембраны; 2 – теплоизоляционный слой из сверхжестких минераловатных плит (по расчету); 3 – рулонный водоизоляционный ковер (существующий); 4 – цементно-песчаная стяжка (существующая); 5 – слой керамзитового гравия по уклону (существующий); 6 – слой теплоизоляции (существующий); 7 – железобетонная многопустотная плита покрытия (существующая)

Fig. 2. Recommended constructive solution for roof rehabilitation: 1 – water-insulating carpet made of PVC-membrane; 2 – thermal insulation layer of super-rigid mineral wool slabs (according to calculation); 3 – rolled water-insulating carpet (existing); 4 – cement-sand screed (existing); 5 – layer of expanded clay gravel along slope (existing); 6 – layer of thermal insulation (existing); 7 – reinforced concrete multi-hollow coating plate (existing)

Предлагается следующая схема производства. До начала работ производятся натурные обследования кровли с целью оценки технического состояния водоизоляционного ковра и выравнивающей стяжки. По их результатам разрабатывается ППР на реабилитацию кровли. В составе ППР создаются следующие технологические карты:

– ремонт выравнивающей стяжки на участках кровли, где она разрушена или имеет просадки более 10 мм;

- устранение дефектов водоизоляционного ковра;
- устройство теплоизоляционного слоя;
- закрепление ПВХ-мембраны по плитному утеплителю.

Ремонт выравнивающей стяжки выполняется на участках кровли, где она разрушена или имеет просадки более 5 мм. До начала работ на ремонтируемых участках стяжки снимают водоизоляционный ковер, демонтируют разрушенный материал стяжки, очищают поверхность от грязи и пыли и в случае необходимости просушивают. Как правило, ремонт выравнивающей стяжки сводится к выравниванию ее поверхности слоем холодной мелкозернистой асфальтобетонной (при отрицательных температурах наружного воздуха) или цементно-песчаной смеси. При этом обеспечиваются один уровень и один уклон поверхности со смежными участками.

Ремонт рулонного водоизоляционного ковра сводится к устранению в нем дефектов с помощью устройства заплат в виде одного или двух дополнительных слоев рулонного материала на поврежденные участки кровли. Заплаты изготавливают из рулонных материалов, совместимых с материалом ремонтируемого водоизоляционного ковра. В зависимости от вида дефектов в эксплуатируемом рулонном ковре предлагается следующая технология производства работ по их устранению. Чтобы убрать разрывы водоизоляционного ковра, ремонтируемый участок до начала работ очищают от пыли, грязи и просушивают. Затем поврежденный участок до поверхности кровли проконопачивают паклей, пропитанной мастикой. На подготовленную поверхность водоизоляционного ковра наклеивают заплату, перекрывающую границы повреждения на 100–150 мм.

Пробоины слоев водоизоляционного ковра до начала работ необходимо расчистить от поврежденного рулонного материала, от грязи и пыли, просушить. Новые слои рулонного материала следует плотно прижимать к основанию, а стыки шпательовать мастикой. Шпательку накладывают по периметру верхнего дополнительного слоя. Сопряжение полотнищ между собой (при больших повреждениях) производится с учетом указаний для устройства нового

ковра. Число вновь наклеиваемых слоев из рулонного материала должно быть на один слой больше снятых. Каждый последующий слой должен перекрывать стык нижних слоев не менее чем на 150 мм.

Вздутия (воздушные мешки) водоизоляционного ковра устраняют следующим образом. Вначале делают крестообразный разрез кровельного ковра в месте его вздутия. Затем, отогнув разрезанные края ковра в стороны, очищают вскрытую поверхность от пыли и грязи. При необходимости ремонтируемую поверхность кровельного ковра сушат. Для гарантированного удаления влаги рекомендуется применять сушильные установки с принудительной вентиляцией марки СО-222. На поврежденный участок по контуру вздутия наносится мастика, выдерживается до прекращения прилипания и затем тщательно прижимается от краев к разрезу. На место разреза наклеивается заплата, которая должна перекрывать поврежденный участок на 100–150 мм.

Отслоившиеся участки водоизоляционного ковра приклеивают к основанию. Расслоившиеся между собой полотнища склеивают и надежно соединяют в швах. Ремонтируемые участки тщательно укатывают катком после предварительной шпательки швов мастикой. На поврежденные кромки верхних полотнищ наклеивают заплату.

В последние годы в Беларуси при ремонте рулонных кровель применяется эффективная технология термомеханической обработки водоизоляционного ковра, основанная на регенерации содержащихся в рулонном ковре битумных материалов. В основу технологии положен принцип прогрева существующего рулонного материала с помощью термоэлектрического аппарата марки АП (масса аппарата 16 кг, размеры в плане 1,2×1,2 м, производительность – до 100 м² кровли в день). По завершении работ по ремонту водоизоляционного ковра приступают непосредственно к устройству слоя теплоизоляции.

Теплоизоляция инверсионной кровли выполняется из минераловатных плит прочностью на сжатие не менее 0,1 МПа без применения механических креплений [12]. Теплоизоляции

онные плиты укладывают на битумную мастику следующим образом. До начала работ для обеспечения ровности основания под плитный утеплитель выполняется нивелирование поверхности водоизоляционного ковра на площади не менее одной захватки. Затем на подготовленную (очищенную от пыли и грязи) поверхность отремонтированного водоизоляционного ковра наносят битумную мастику и сразу разравнивают ее тонким слоем. На свеженанесенную мастику (по делям) укладывают маячные теплоизоляционные плиты, плотно прижимая их к подготовленной поверхности. По завершении работ по укладке маячных рядов изолировщики аналогичным образом укладывают рядовые плиты. Теплоизоляционные плиты должны плотно прилегать друг к другу и склеиваться с несущим основанием (водоизоляционным ковром) по всей площади. Зазоры в стыках между уложенными плитами шириной более 5 мм заполняют крошкой теплоизоляционного материала, уплотняют и заливают мастикой. По завершении работ по устройству плит теплоизоляции крепят водоизоляционный ковер из ПВХ-мембран, укладываемых в один слой при температуре наружного воздуха до минус 45 °С. Они стойки к УФ-излучению, что не требует защитной посыпки, а способность пропускать водяной пар исключает появление вздутий (воздушных мешков) при возможном увлажнении слоя утеплителя.

Крепление мембраны к основанию производится теплосварным способом следующим образом. Вначале осуществляется подготовка кромок отдельных полотнищ к сварке. Мембранное полотно в местах сварки (кромка шириной до 1 см) очищается от грязи и выравнивается от складок специальным роликом. Параллельно от грязи очищается основание кровли в местах крепежа ПВХ-мембран к нему. Затем сваркой горячим воздухом с помощью автоматического сварочного аппарата типа VARIMAT выполняется крепление мембранного покрытия к основанию кровли. На данный момент такой теплосварной способ крепления мембран считается более надежным по сравнению с другими: он эффективен при устройстве

совмещенных кровель с минимальным количеством примыканий и большой площадью покрытия.

ВЫВОДЫ

1. Выполненные натурные исследования показали, что фактическая величина сопротивления теплопередаче $R_{\text{фак}}$ эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных покрытий, не имеющих протечек кровли, не превышает 1,5 м²·°С/Вт, что на 30 % меньше запроектированного значения и в четыре раза меньше $R_{\text{норм}} = 6,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$.

2. Установлено, что основной причиной ухудшения эксплуатационных характеристик кровель является увеличение влажности материала теплоизоляционного слоя, которое вызвано разрушением слоя пароизоляции и защитной посыпки, высоким сопротивлением паропроонианию водоизоляционных материалов на основе битума.

3. Предлагаемое конструктивно-технологическое решение реабилитации эксплуатируемых совмещенных утепленных рулонных кровель обеспечивает $R_{\text{норм}} = 6,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$ без демонтажа конструктивных элементов существующей кровли. Применение в качестве водоизоляционного ковра ПВХ-мембран позволит без материальных и финансовых затрат в течение 20 лет исключить появление протечек кровли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черноиван, В. Н. Реабилитация совмещенных утепленных рулонных кровель. Восстановление эксплуатационных характеристик совмещенных утепленных рулонных кровель при их ремонте / В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 93 с.
2. Топчий, В. Д. Реконструкция покрытий гражданских зданий / В. Д. Топчий // Жилищное строительство. 2007. № 8. С. 6–8.
3. Еропов, Л. А. Особенности работы кровель из рулонных кровельных материалов и подходы к их выбору / Л. А. Еропов // Технические науки – от теории к практике. 2012. № 11. С. 74–78.
4. Сиденко, Д. А. Долговечность плоских рулонных кровель / Д. А. Сиденко, В. Б. Белевич // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 8. С. 20–21.

5. Сокова, С. Д. Влияние влаги подкровельного ковра на гидроизоляцию / С. Д. Сокова, П. Г. Фомина // Жилищное строительство. 1997. № 9. С. 9–11.
6. Гуца, Е. В. Надежная изоляция кровель материалами компании Sika / Е. В. Гуца // Кровельные и изоляционные материалы. 2012. № 4. С. 10–11.
7. Черноиван, В. Н. К оценке технического состояния эксплуатируемых совмещенных рулонных кровель / В. Н. Черноиван, С. Н. Леонович, Н. В. Черноиван // Строительная наука и техника. 2011. № 3. С. 47–51.
8. Зернов, А. Е. Надежность плоской кровли / А. Е. Зернов // Строительные материалы. 2006. № 5. С. 13.
9. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43–2006*. Введ. 01.07.2007. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 44 с.
10. Сборник 7. Кровельные работы: Нормы затрат труда на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Введ. 22.07.2009. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 41 с.
11. Сборник 20. Ремонтно-строительные работы. Выпуск 1. Здания и промышленные сооружения: Нормы затрат труда на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Введ. 22.07.2009. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 224 с.
12. Кровли: СН 5.08.01–2019. Введ. 08.09.2020. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 24 с.
13. Обследование строительных конструкций зданий и сооружений. Порядок проведения: ТКП 45-1.04-37–2008*. Введ. 29.12.2008. Минск: Минстройархитектуры, 2014. 39 с.
14. Румянцев, Б. М. Системы изоляции строительных конструкций / Б. М. Румянцев, А. Д. Жуков. М.: МГСУ, 2014. 640 с.
15. Могилат, А. Н. Проектирование теплозащиты покрытий гражданских зданий / А. Н. Могилат, Э. Н. Кривобок. Киев: Будівельник, 1982. 146 с.
- ences – from Theory to Practice], (11), 74–78 (in Russian).
4. Sidenko D. A., Belevich V. B. (2004) Durability of Flat Roll Roofs. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, (8), 20–21 (in Russian).
5. Sokova S. D., Fomina P. G. (1997) Influence of Moisture in the Under-Roof Carpet on Waterproofing. *Zhilishchnoe Stroitelstvo = Housing Construction*, (9), 9–11 (in Russian).
6. Gushcha E. V. (2012) Reliable Roof Insulation with Sika Materials. *Krovelnye i Izolyatsionnye Materialy* [Roofing and Insulation Materials], (4), 10–11 (in Russian).
7. Chernoiivan V. N., Leonovich S. N., Chernoiivan N. V. (2011) To the Assessment of the Technical Condition of the Operated Combined Roll Roofs. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (3), 47–51 (in Russian).
8. Zernov A. E. (2006) Reliability of Flat Roof. *Stroitelnye Materialy = Construction Materials*, (5), 13 (in Russian).
9. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-2.04-43–2006. *Construction Heat Engineering. Building Design Codes*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2015. 44 (in Russian).
10. *Collection 7. Roofing Works: Norms of Labor Costs for Construction, Installation and Repair and Construction Works*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2009. 41 (in Russian).
11. *Collection 20. Repair and Construction Works. Issue 1. Buildings and Industrial Structures: Norms of Labor Costs for Construction, Installation and Repair and Construction Works*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2009. 224 (in Russian).
12. SN [Building Codes] 5.08.01–2019. *Roofs*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2020. 24 (in Russian).
13. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-1.04-37–2008. *Inspection of Building Structures of Buildings and Constructions. Inspection Procedure*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2014. 39 (in Russian).
14. Rumyantsev B. M., Zhukov A. D. (2014) *Insulation Systems for Building Structures*. Moscow, Publishing House of Moscow State University of Civil Engineering. 640 (in Russian).
15. Mogilat A. N., Krivobok E. N. (1982) *Design of Thermal Protection of Coatings for Civil Buildings*. Kiev, Budivelnik Publ. 146 (in Russian).

Поступила 29.09.2021

Подписана в печать 30.11.2021

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. Chernoiivan V. N., Chernoiivan N. V. (2014) *Rehabilitation of Combined Insulated Roll Roofs. Restoration of Operational Characteristics of Combined Insulated Roll Roofs During Their Repair*. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing. 93 (in Russian).
2. Topchii V. D. (2007) Reconstruction of Coverings of Civil Buildings. *Zhilishchnoe Stroitelstvo = Housing Construction*, (8), 6–8 (in Russian).
3. Eropov L. A. (2012) Features of Operation of Roofs from Roll Roofing Materials and Approaches to their Selection. *Tekhnicheskie Nauki – ot Teorii k Praktike* [Technical Sci-

Received: 29.09.2021

Accepted: 30.11.2021

Published online: 28.01.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-57-62>

УДК 666.972.165

Комплексные добавки к бетону на основе веществ органической и минеральной природы

Инж. И. Р. Смирнов¹⁾

¹⁾Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» (Жлобин, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Производство бетонов, обладающих высокой скоростью твердения, не осуществимо без применения модифицирующих добавок. Развитие химической промышленности обусловило появление большого количества добавок с различными свойствами. Одни увеличивают морозо- и коррозионную стойкость, прочность строительных материалов, другие влияют на процессы схватывания бетона и водоцементное отношение. Наибольший интерес представляет совместная работа добавок в составе цементного камня. В статье приведен анализ и определено влияние различных комбинаций химических добавок (карбоната натрия Na_2CO_3 , хлорида натрия NaCl , нитрата натрия NaNO_3) на структурообразование и свойства цементного камня в составе комплексной добавки с помощью метода симплекс-решетчатого планирования эксперимента. В ходе исследований для получения цементного камня использовали портландцемент М500 Д0 с добавлением в установленных пропорциях Na_2CO_3 , NaCl и NaNO_3 . В результате испытаний найдено оптимальное соотношение компонентов в составе комплексной добавки: NaNO_3 – 12–38 %; NaCl – 34–54 %; Na_2CO_3 – 26–42 %. При введении данного комплекса в состав бетонной смеси наблюдались положительная динамика в нейтрализации коррозионного воздействия на арматуру в бетоне, а также ускоренный набор твердости бетоном. Полученные результаты могут быть использованы на профильных предприятиях химической промышленности и в исследованиях при разработке модифицирующих добавок.

Ключевые слова: метод симплекс-решетчатого планирования, модифицирующие добавки, твердость, коррозия, цементный камень, трехкомпонентные диаграммы свойств

Для цитирования: Смирнов, И. Р. Комплексные добавки к бетону на основе веществ органической и минеральной природы / И. Р. Смирнов // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 57–62. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-57-62>

Complex Additives for Concrete Based on Substances of Organic and Mineral Nature

I. R. Smirnov¹⁾

¹⁾OJSC “Byelorussian Steel Works – Management Company of Byelorussian Metallurgical Company Holding” (Zhlobin, Republic of Belarus)

Abstract. The production of concretes with a hard hardening rate is not feasible without the use of modifying additives. The development of the chemical industry has led to the emergence of a large number of additives with different properties. Some increase the frost and corrosion resistance, the strength of building materials, while others affect the setting of concrete and the water-cement ratio. Of greatest interest is the joint work of the additives in the composition of the cement stone. The paper analyzes and determines the effect of various combinations of chemical additives (sodium carbonate Na_2CO_3 , sodium chloride NaCl and sodium nitrate NaNO_3) on the structure formation and properties of cement stone as part of a complex additive using the simplex-lattice experiment planning method. In the course of the research, to obtain cement stone, Portland cement M500 D0 has been used with the addition of Na_2CO_3 , NaCl and NaNO_3 in the established proportions. As a result of tests, it has been found that the following proportions of the components in the composition of the complex additive are optimal: NaNO_3 – 12–38 %; NaCl – 34–54 %; Na_2CO_3 – 26–42 %. With the introduction of this complex into the composition of the concrete mixture, positive dynamics have been observed in neutralizing the corrosion effect on reinforcement in concrete, as well as an accelerated set of concrete hardness. The results obtained can be used at specialized enterprises of the chemical industry, as well as in further research in the development of modifying additives.

Keywords: simplex lattice planning method, modifying additives, hardness, corrosion, cement stone, three-component diagram of properties

For citation: Smirnov I. R. (2022) Complex Additives for Concrete Based on Substances of Organic and Mineral Nature. *Science and Technique*. 21 (1), 57–62. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-57-62> (in Russian)

Адрес для переписки

Смирнов Иван Русланович
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга БМК»
ул. Промышленная, 37,
247210, г. Жлобин, Республика Беларусь
Тел.: +375 2334 5-57-38
nti.to@bmz.gomel.by

Address for correspondence

Smirnov Ivan R.
OJSC “BSW – Management Company of BMC Holding”
37, Promyshlennaya str.,
247210, Zhlobin, Republic of Belarus
Tel.: +375 2334 5-57-38
nti.to@bmz.gomel.by

Введение

Во всем мире строительная отрасль развивается очень интенсивно, и сегодня капитальное строительство невозможно представить без бетона и железобетона. Поэтому современный модифицированный бетон – важный и практически незаменимый материал. С увеличением темпов строительства остро стоят вопросы модернизации производства, разработки новых технологий, которые позволят изготавливать бетоны с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Развитие химической промышленности обусловило появление большого количества добавок, обладающих различными свойствами. Одни увеличивают морозо- и коррозионную стойкость, прочность строительных материалов, другие влияют на процессы схватывания бетона и водоцементное отношение. Наибольший интерес представляет совместная работа добавок в составе цементного камня.

Производство бетонов, обладающих высокой скоростью твердения, не осуществимо без использования модифицирующих добавок. Сегодня науке известен большой список химических компонентов, предназначенных для этих целей: Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , CaCl_2 и др. Чаще всего производители добавок дают неполную информацию о них, что значительно осложняет работу по определению их воздействия на материалы и изделия. Из-за этого в ходе исследований бывает затруднительно определить степень влияния тех или иных компонентов добавок на арматуру и бетон, например в случаях содержания в добавках хлоридов (CaCl_2 и NaCl). Данные компоненты в составе добавок оказывают агрессивное коррозионное воздействие на арматуру. Нейтрализация этого негативного фактора – весьма актуальная задача [1–5].

Анализ влияния компонентов добавки на характеристики цементного камня

Экспериментальные исследования свойств различных химических соединений и определение их воздействий требуют значительных ресурсов. Зачастую создание комплексов химических соединений, являющихся объектами исследования, – довольно сложный процесс, чтобы за короткое время выполнить его теоретический анализ. Поэтому для уменьшения количества экспериментов и ускорения их проведения при определении совокупного влияния

добавок на свойства цементного камня используют методы планирования эксперимента. Они позволяют создать достаточно точную, учитывающую одновременно все факторы математическую модель поведения добавки в составе бетона. На основе этой модели можно получать данные о взаимодействии компонентов, а также их количественную оценку.

В статье рассматривается метод симплекс-решетчатого планирования для разработки универсального состава на основе карбоната натрия Na_2CO_3 , хлорида натрия NaCl , нитрата натрия NaNO_3 путем затворения данных компонентов с портландцементом. С помощью данного метода установили целесообразный порядок проведения исследований, а также комплексное влияние добавок на свойства цементного камня и необходимую точность результатов расчетов [6–10].

При проведении исследований для получения цементного камня использовали портландцемент М500 Д0 с добавлением определенного количества компонентов Na_2CO_3 , NaCl и NaNO_3 (табл. 1). Образцы формировали следующим образом: подготавливали раствор на основе дистиллированной воды массой 20 г с добавлением Na_2CO_3 , NaCl и NaNO_3 в установленных пропорциях (совокупная масса составляла 0,50 г). Затем раствором затворяли 50 г портландцемента с последующим перемешиванием, полученную массу заливали в подготовленные формы и помещали на виброплощадку. В табл. 1 представлены матрица симплекс-решетчатого планирования и значения твердости образца в возрасте 7 и 28 сут. Всего экспериментальных точек – 15, которые распределяли согласно матрице {3, 4}, что соответствует модели четвертого порядка.

В ходе экспериментов устанавливали: сроки схватывания, водопоглощение, нормальную плотность цементного теста, твердость образцов в возрасте 3, 7, 14 и 28 сут., открытую пористость и интенсивность испарения воды для вяжущего с комплексом добавок. Твердость образца определяли как величину углубления индентора на конце измерительного шупа в тело образца под постоянной нагрузкой 3 кг. Показания снимали со шкалы индикатора часового типа, закрепленного на штативе. Индентор – игла с углом при вершине 30° (цена деления 0,01 мм). При испытаниях каждую добавку (X_1 – NaNO_3 ; X_2 – NaCl ; X_3 – Na_2CO_3) брали в концентрации 0,25–1,00 %.

Таблица 1

Матрица симплекс-решетчатого планирования эксперимента

Matrix of simplex-lattice experiment planning

Число точек	Масса компонентов, г			Доля компонентов			Твердость образца (глубина проникновения индентора), мм	
	NaNO ₃	NaCl	Na ₂ CO ₃	X ₁	X ₂	X ₃	7 сут.	28 сут.
1	0,500	0	0	1	0	0	0,116	0,079
2	0	0,500	0	0	1	0	0,103	0,060
3	0	0	0,500	0	0	1	0,138	0,077
4	0,250	0,250	0	0,50	0,50	0	0,115	0,068
5	0,250	0	0,250	0,50	0	0,50	0,128	0,066
6	0	0,250	0,250	0	0,50	0,50	0,132	0,088
7	0,875	0,125	0	0,75	0,25	0	0,107	0,060
8	0,125	0,875	0	0,25	0,75	0	0,123	0,077
9	0,875	0	0,125	0,75	0	0,25	0,110	0,096
10	0,125	0	0,875	0,25	0	0,75	0,112	0,070
11	0	0,875	0,125	0	0,75	0,25	0,135	0,093
12	0	0,125	0,875	0	0,25	0,75	0,177	0,106
13	0,250	0,125	0,125	0,50	0,25	0,25	0,127	0,080
14	0,125	0,250	0,125	0,25	0,50	0,25	0,114	0,069
15	0,125	0,125	0,250	0,25	0,25	0,50	0,129	0,078

Исследуемые свойства можно представить в виде полинома определенной степени n от g переменных (числа экспериментальных точек). В качестве g переменных выступали концентрации компонентов смеси. В совокупности g и n образуют решетку, где число коэффициентов полинома равно числу экспериментальных точек. Обязательное условие метода симплекс-решетчатого планирования таково: если X_i – концентрация компонентов смеси в кодированных значениях исследуемых факторов ($X_j = 0-1$), то $\sum X_i = 1$ [6–10]. На основании данных табл. 1 по формулам расчета коэффициентов полинома четвертого порядка для трехкомпонентной смеси были получены уравнения регрессии, отражающие влияние комплекса добавок NaNO₃–NaCl–Na₂CO₃ на прочность вяжущего через 7 и 28 сут. соответственно:

$$Y_7 = 11,6X_1 + 10,3X_2 + 13,8X_3 + 2,2X_1X_2 + 0,4X_1X_3 + 4,6X_2X_3 - 12X_1X_2(X_1 - X_2) + 4,8X_1X_3(X_1 - X_3) - 13,07X_2X_3(X_2 - X_3) + 2,93X_1X_2(X_1 - X_2)^2 - 35,7X_1X_3(X_1 - X_3)^2 + 57,3X_2X_3(X_2 - X_3)^2 + 137,87X_1^2X_2X_3 - 138,13X_1X_2^2X_3 - 42,4X_1X_2X_3^2; \quad (1)$$

$$Y_{28} = 7,9X_1 + 6X_2 + 7,7X_3 - 0,6X_1X_2 - 4,8X_1X_3 + 7,8X_2X_3 - 14,13X_1X_2(X_1 - X_2) + 13,3X_1X_3(X_1 - X_3) - 2,4X_2X_3(X_2 - X_3) + 0,27X_1X_2(X_1 - X_2)^2 + 29,87X_1X_3(X_1 - X_3)^2 + 34,93X_2X_3(X_2 - X_3)^2 + 98,4X_1^2X_2X_3 - 137,6X_1X_2^2X_3 + 17,87X_1X_2X_3^2. \quad (2)$$

По уравнениям (1), (2) и данным табл. 1 для твердости образцов в возрасте 7 и 28 сут. построены трехкомпонентные диаграммы (рис. 1, 2) в программе Simplex, разработанной доктором технических наук, профессором кафедры «Строительные технологии и конструкции» Белорусского государственного университета транспорта А. С. Неверовым. Изолинии на диаграммах показывают изменение твердости образца в зависимости от концентрации каждой из добавок.

В возрасте 7 сут. наблюдались две оптимальные зоны, которые были локализованы в следующих концентрациях компонентов:

1) NaNO₃ – 8–30 %; NaCl – 54–80 %; Na₂CO₃ – 18–44 %;

2) NaNO₃ – 58–100 %; NaCl – 0–42 %; Na₂CO₃ – 0–28 %.

С течением времени на 28-е сутки первая зона стабильно сохраняла свое положение, а вторая уменьшалась и смещалась к концентрациям со следующим содержанием компонентов: Na₂CO₃ – 0–2 %; NaNO₃ – 54–86 %; NaCl – 46–14 %. В данном случае оптимальным многофункциональным составом следует принимать такой, концентрации которого на диаграммах соответствуют первой зоне с содержанием компонентов добавок: Na₂CO₃ – 12–42 %; NaNO₃ – 12–38 %; NaCl – 32–60 %.

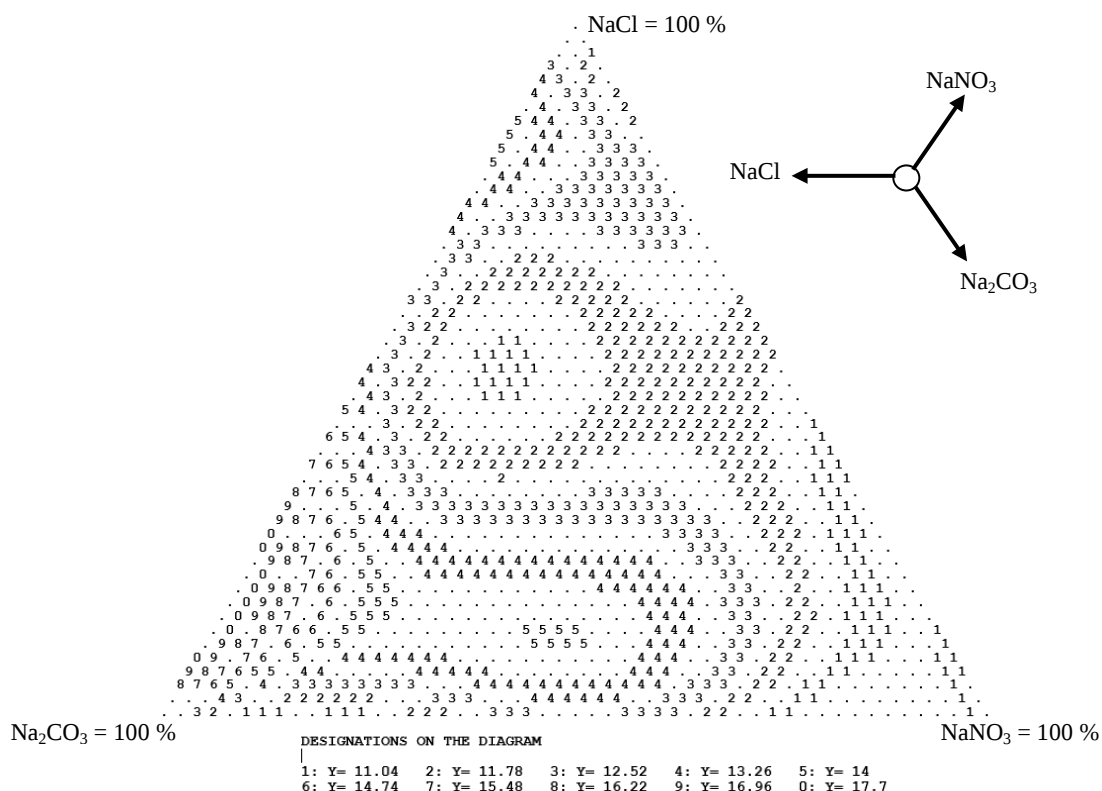


Рис. 1. Зависимость твердости образца через 7 сут. после формования от состава комплексной добавки

Fig. 1. Dependence of sample hardness 7 days after molding on composition of complex additive

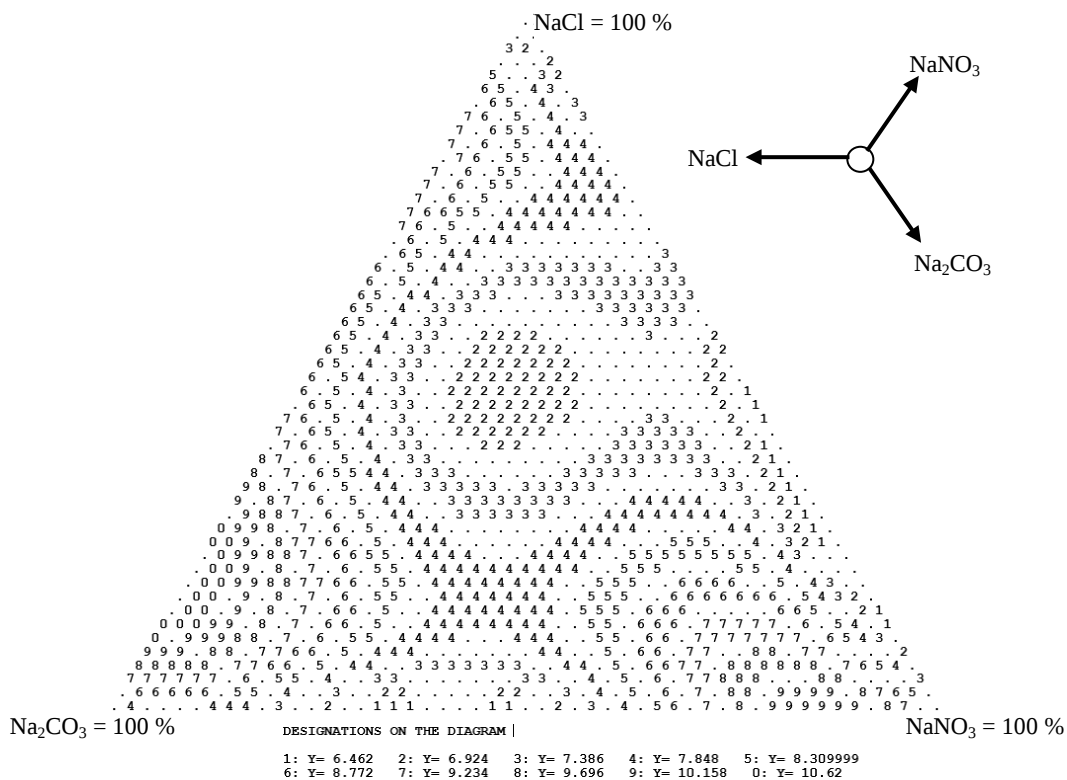


Рис. 2. Зависимость твердости образца через 28 сут. после формования от состава комплексной добавки

Fig. 2. Dependence of sample hardness 28 days after molding on composition of complex additive

Изменение скорости коррозии металла в растворе солей (1 г солей на 1 л воды) определяли с помощью коррозиметра «Эксперт-004», щупы которого помещали в жидкую среду добавки. Затем с прибора снимали показания и обрабатывали способом, описанным выше для определения твердости. По полученным данным строили диаграмму, приведенную на рис. 3.

Как видно из рис. 3, прослеживается эффект замедления коррозии при определенных концентрациях компонентов. Исходя из оценки их совместной работы в составе комплекса, удовлетворительными приняты следующие концентрации: NaNO_3 – 0–72 %; NaCl – 0–54 %; Na_2CO_3 – 14–100 %.

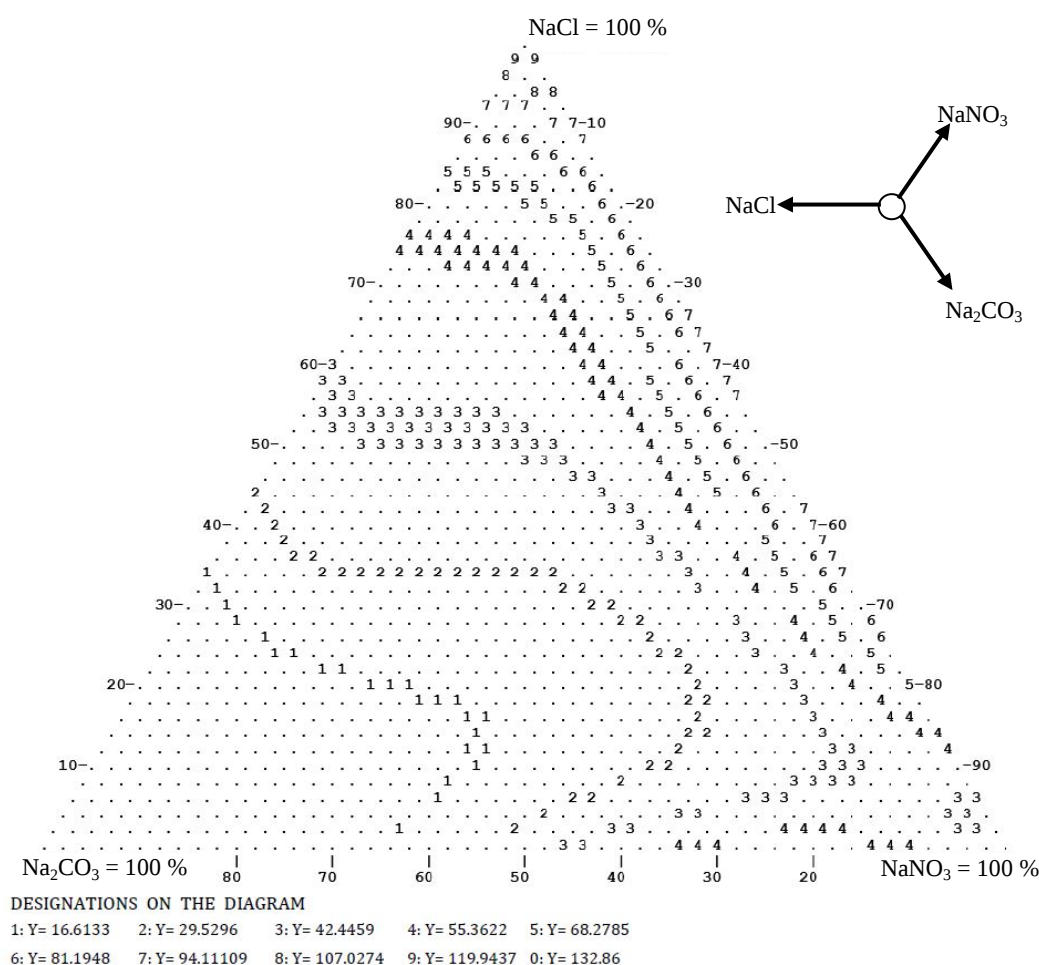


Рис. 3. Показатель коррозии (мкм/год) в растворе солей NaNO_3 , NaCl и Na_2CO_3 в зависимости от состава раствора

Fig. 3. Corrosion index ($\mu\text{m}/\text{year}$) in solution of NaNO_3 , NaCl and Na_2CO_3 salts, depending on composition of solution

ВЫВОД

Исследованиями установлено, что оптимальными являются следующие доли компонентов в составе комплекса добавки: NaNO_3 – 12–38 %; NaCl – 34–54 %; Na_2CO_3 – 26–42 %. Добавление данного состава в бетонную смесь положительно влияло на ее физико-механические свойства: наблюдались положительная динамика в нейтрализации коррозионного воз-

действия на арматуру в бетоне, а также ускоренный набор твердости бетоном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов, Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. М.: Изд-во АСВ, 2006. 368 с.
2. Изотов, В. С. Химические добавки для модификации бетона / В. С. Изотов. М.: Казанский гос. архит.-строит. ун-т: Палеотип, 2006. 244 с.

3. Ибрагимов, Р. А. Использование сульфатно-содовой смеси в качестве ускорителя твердения в технологии тяжелого бетона / Р. А. Ибрагимов, В. С. Изотов, Р. Х. Хузиахметов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 9. С. 167–170.
4. Тараканов, О. В. Химические добавки в растворы и бетоны / О. В. Тараканов. Пенза: Пензен. гос. ун-т архит. и стр-ва, 2016. 155 с.
5. Перцев, В. Т. Комплексные органоминеральные добавки для бетонов / В. Т. Перцев, А. А. Леденев, Я. З. Халилбеков // Символ науки. 2017. № 04-2. С. 89–91.
6. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. М.: Высш. шк., 1978. 319 с.
7. Калиногорский, Н. А. Планирование эксперимента при изучении диаграмм состав – свойство / Н. А. Калиногорский. Новокузнецк: СибГИУ, 2011. 12 с.
8. Зедгенидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгенидзе. М.: Наука, 1976. 390 с.
9. Хамханов, К. М. Основы планирования эксперимента / К. М. Хамханов. Улан-Удэ: Вост.-Сиб. гос. ун-т техн. и управл., 2001. 50 с.
10. Юдин, Ю. В. Организация и математическое планирование эксперимента / Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе, Ф. В. Водолазский. Екатеринбург: Урал. федар. ун-т, 2018. 124 с.

Поступила 28.04.2021

Подписана в печать 06.07.2021

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. Bazhenov Yu. M., Demyanova V. S., Kalashnikov V. I. (2006) *Modified High-Quality Concrete*. Moscow, ASV Publ., 2006. 368 (in Russian).

2. Izotov V. S. (2006) *Chemical Additives for Concrete Modification*. Moscow, Kazan State University of Architecture and Engineering, Publishing House "Paleotip". 244 (in Russian).
3. Ibragimov R. A., Izotov V. S., Khuziakhmetov R. Kh. (2015) The Use of Sulfate-Soda Mixture as a Hardening Accelerator in Heavy Concrete Technology. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta = Bulletin of the Technological University*, 18 (9), 167–170 (in Russian).
4. Tarakanov O. V. (2016) *Chemical Additives in Solutions and Concretes*. Penza, Publishing House of the Penza State University of Architecture and Construction. 155 (in Russian).
5. Pertsev V. T., Ledenev A. A., Khalilbekov Ya. Z. (2017) Complex Organic Mineral Additives for Concrete. *Simvol Nauki = Symbol of Science*, (04-2), 89–91 (in Russian).
6. Akhnazarova S. L., Kafarov V. V. (1978) *Optimization of Experiment in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 319 (in Russian).
7. Kalinogorskiy N. A. (2011) *Planning an Experiment when Studying Composition-Property Diagrams*. Novokuznetsk, Publishing Centre of Siberian State Industrial University. 12 (in Russian).
8. Zedgenidze I. G. (1976) *Planning an Experiment for the Study of Multicomponent Systems*. Moscow, Nauka Publ. 390 (in Russian).
9. Khamkhanov K. M. (2001) *Experiment Planning Fundamentals*. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management. 50 (in Russian).
10. Yudin Yu. V., Maisuradze M. V., Vodolazsky F. V. (2018) *Organization and Mathematical Planning of the Experiment*. Yekaterinburg, Publishing House Ural Federal University. 124 (in Russian).

Received: 28.04.2021

Accepted: 06.07.2021

Published online: 28.01.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-63-72>

УДК 629.3.017.5:681.523.5

О торможении колесного транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия

Доктора техн. наук, профессора Д. Н. Леонтьев¹, В. А. Богомолов¹, В. И. Клименко¹,
кандидаты техн. наук, профессора Л. А. Рыжих¹, С. И. Ломака¹,
аспиранты А. В. Сухомлин¹, А. В. Курипка¹, А. А. Фролов²

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина),

²Харьковский научно-исследовательский институт судебных экспертиз имени засл. проф. Н. С. Бокариуса
(Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Предлагается способ определения остановочного пути транспортного средства на основе коэффициента торможения и коэффициента использования силы сцепления автоматизированной системой регулирования тормозного усилия на примере многоосного автомобиля. Исследование заключалось в том, чтобы на основе реализуемого сцепления между шиной и опорной поверхностью расчетным путем определить параметры эффективности торможения многоосного колесного транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия. Наличие новых математических взаимосвязей между положением координаты центра тяжести транспортного средства, реализуемым сцеплением его колес, и коэффициентом торможения автомобиля позволяет моделировать изменение замедления колесной машины в различных тормозных режимах ее движения. Обоснованы термины, описывающие взаимодействие эластичной шины с опорной поверхностью в режиме торможения колесной машины. Записаны уравнения, позволяющие рассчитать: положение координаты центра тяжести многоосного колесного транспортного средства относительно его передних и задних мостов; значение коэффициента торможения многоосной колесной машины на основе координат положения центра ее тяжести, сцеплений, которые реализуются между ее шинами и опорной поверхностью; распределение нагрузки между соответствующими передними и задними мостами транспортного средства. Для расчета остановочного пути колесного транспортного средства предлагается значение коэффициента использования силы сцепления принимать равным 0,83 независимо от изменения погодноклиматических условий, в которых эксплуатируется автомобиль (погрешность расчетов при принятом допущении не более 5 %). В графическом виде представлена расчетная схема положения координат центра тяжести многоосной колесной машины, дающая общее представление о перераспределении масс между передними и задними мостами автомобиля. Проанализированы научные публикации по изменению величины реализуемого сцепления между шиной и опорной поверхностью в режиме торможения автомобильного колеса при различных факторах. Предлагаемая концепция определения параметров эффективности торможения многоосной колесной машины уточняет некоторые положения теории движения автомобиля, в частности позволяет применить расчетный метод определения замедления автомобиля в задаче приращения вертикальных нагрузок на осях многоосного колесного транспортного средства в режиме торможения. Приведенный способ расчета коэффициентов распределения веса между смежными передними или задними мостами многоосной колесной машины повышает точность определения величины замедления автомобиля расчетным методом.

Ключевые слова: колесо, шина, опорная поверхность, коэффициент сцепления, реализуемое сцепление, коэффициент торможения, коэффициент использования силы сцепления, тормозной путь, процесс торможения, тормозное усилие, многоосный автомобиль, транспортное средство

Для цитирования: О торможении колесного транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия / Д. Н. Леонтьев [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 63–72. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-63-72>

Адрес для переписки

Леонтьев Дмитрий Николаевич
Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
ул. Ярослава Мудрого, 25,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 057 700-38-77
dima.a3alij@gmail.com

Address for correspondence

Leontiev Dmitry N.
Kharkiv National
Automobile and Highway University
25, Yaroslava Mudrogo str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +38 057 700-38-77
dima.a3alij@gmail.com

About Braking of Wheeled Vehicle Equipped with Automated Brake Control System

D. N. Leontiev¹⁾, V. A. Bogomolov¹⁾, V. I. Klymenko¹⁾, L. A. Ryzhyh¹⁾, S. I. Lomaka¹⁾,
A. V. Suhomlin¹⁾, A. V. Kuripka¹⁾, A. A. Frolov²⁾

¹⁾Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine),

²⁾National Scientific Center "Hon. Prof. M. S. Bokarius Forensic Science Institute" (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. The paper proposes a method for determining a vehicle stopping distance based on a braking rate and a coefficient of using an adhesion force by an automated control system for regulating a braking force on the example of a multi-axle vehicle. The aim of the study is to calculate parameters of the braking efficiency of a multi-axle wheeled vehicle equipped with an automated braking force control system based on the adhesion between a tire and a supporting surface. A peculiarity of the considered method is the use of the calculated braking coefficient of the vehicle and the coefficient of use of adhesion forces during the operation of automated system for regulating the braking force. The presence of new mathematical relationships between the position of the coordinate of the vehicle's gravity center, realized by the clutches of its wheels, and the braking coefficient of the vehicle makes it possible to simulate the change in the deceleration of a wheeled vehicle in various braking modes of its motion. The terms describing the interaction of an elastic tire with a supporting surface in the braking mode of a wheeled vehicle have been substantiated. Equations are written that permit to calculate: a position of the coordinate of gravity center of a multi-axle wheeled vehicle relative to its front and rear axles; a braking coefficient value of a multi-axle wheeled vehicle based on the coordinates of the position of its gravity center, clutches that are realized between its tires and a supporting surface; load distribution between the respective front and rear axles of the vehicle. To calculate the stopping distance of a wheeled vehicle, it is proposed to take a coefficient value of use of the adhesion force equal to 0.83, regardless of the change in weather and climatic conditions in which the vehicle is operated (a calculation error under an accepted assumption is not more than 5 %). In a graphical form, a design diagram of the coordinate position of a gravity center of a multi-axle wheeled vehicle is presented, which gives a general idea about the redistribution of masses between front and rear axles of the vehicle. Scientific publications on the change in the value of the realized adhesion between the tire and the supporting surface in the braking mode of the automobile wheel under various factors have been analyzed in the paper. The proposed concept for determining parameters of the braking efficiency of a multi-axle wheeled vehicle clarifies some provisions in the theory of vehicle motion, in particular, it allows to apply the calculated method for determining the deceleration of a vehicle in the problem of increasing vertical loads on the axles of a multi-axle wheeled vehicle in the braking mode. The given method for calculating coefficients of weight distribution between adjacent front or rear axles of a multi-axle wheeled vehicle increases an accuracy of determining the amount of deceleration of the vehicle by the calculation method.

Keywords: wheel, tire, supporting surface, coefficient of adhesion, utilized adhesion, braking rate, coefficient utilizing braking forces, braking distances, braking process, braking force, multi-axle vehicle, vehicle

For citation: Leontiev D. N., Bogomolov V. A., Klymenko V. I., Ryzhyh L. A., Lomaka S. I., Suhomlin A. V., Kuripka A. V., Frolov A. A. (2022) About Braking of Wheeled Vehicle Equipped with Automated Brake Control System. *Science and Technique*. 21 (1), 63–72. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-63-72> (in Russian)

Введение

В теории автомобиля есть много противоречий, которые возникают из-за отсутствия единой терминологии при описании тех или иных физических процессов. Одно из них – применение зависимости, которая говорит о том, что замедление колесного транспортного средства (КТС), а значит, и его тормозной путь не зависят от массы

$$\varphi = \frac{j_{\max}}{g}, \quad (1)$$

где φ – коэффициент сцепления [1, 2]; g – ускорение свободного падения, м/с²; $j_{\max}$ – максимально возможное замедление транспортного средства, полученное при затормаживании колес без их блокирования, м/с².

Но на практике это не так, ведь известно [1, 2], что тормозной путь (S_T) большегрузного автомобиля или автобуса больше тормозного пути легкового автомобиля

$$S_T \approx \frac{v_n - v_{\text{кон}}}{3,6} (t_2 + 0,5t_3) + \frac{(v_n - v_{\text{кон}})^2}{254\varphi}, \quad (2)$$

где S_T – тормозной путь транспортного средства, м; v_n , $v_{\text{кон}}$ – скорость в начале и конце процесса торможения, км/ч; t_2 – время запаздывания между нажатием на педаль тормоза и началом нарастания замедления КТС, с; t_3 – время нарастания замедления КТС, с.

Поэтому в международных стандартах в отношении торможения транспортного средства

вместо (1) используется зависимость, которая характеризует процесс торможения через так называемый коэффициент торможения z

$$z = \frac{j}{g}, \quad (3)$$

где j – замедление колесного транспортного средства, м/с^2 .

Очевидно, что специалистам в области автомобилестроения надо различать физический смысл, заложенный в одних и тех же зависимостях: $j_{\max} = \varphi g$ и $j = zg$. Для понимания логики и смысла материала, изложенного далее, следует привести формулировку и терминологию, которые могут быть не совершенны, но отражают физику процесса взаимодействия шины автомобильного колеса с поверхностью дорожного покрытия в режиме торможения КТС.

Технические термины, принятые в публикации

В формулах, приведенных ниже, приняты обозначения в соответствии с рис. 1, на котором изображен процесс блокирования автомобильного колеса в зависимости от коэффициента скольжения шины колеса относительно поверхности дорожного покрытия.

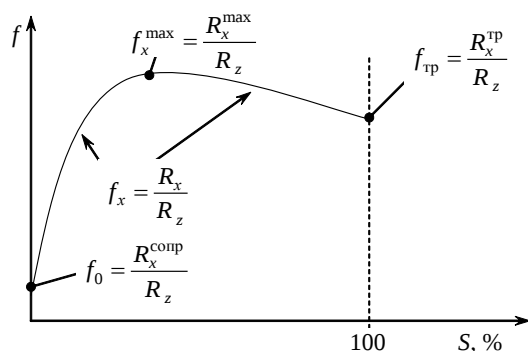


Рис. 1. Зависимость величины реализуемого сцепления f от коэффициента скольжения S шины автомобильного колеса относительно поверхности дорожного покрытия

Fig. 1. Dependence of realized adhesion f value on sliding S coefficient of automobile wheel tire relative to road surface

Процесс, изображенный на рис. 1, может быть описан следующими техническими терминами.

Реализуемое сцепление – отношение любой продольной реакции опорной поверхности R_x к соответствующей нормальной реакции R_z , которые действуют на шину затормаживаемого вращающегося колеса

$$f_x = \frac{R_x}{R_z}. \quad (4)$$

Максимальное реализуемое сцепление (коэффициент сцепления) – отношение максимально возможной в данных условиях торможения продольной реакции опорной поверхности $R_x^{\max}$ к соответствующей нормальной реакции R_z , которые действуют на шину затормаживаемого вращающегося колеса

$$f_x^{\max} = \frac{R_x^{\max}}{R_z}. \quad (5)$$

Реализуемое сцепление оси – это среднее значение реализуемых сцеплений между шиной и поверхностью дорожного покрытия соответствующего левого $f_{xi}^{\text{лев}}$ и правого $f_{xi}^{\text{прав}}$ колес одной оси транспортного средства

$$f_i = \frac{f_{xi}^{\text{лев}} + f_{xi}^{\text{прав}}}{2}, \quad (6)$$

где i – индекс, обозначающий порядковый номер оси колесного транспортного средства.

Реализуемое сцепление, вызванное сопротивлением качения колеса (коэффициент сопротивления качению), – отношение продольной реакции опорной поверхности $R_x^{\text{соп}}$ к вертикальной реакции R_z , которые действуют на шину катящегося колеса в условиях отсутствия тормозного или тягового момента

$$f_0 = \frac{R_x^{\text{соп}}}{R_z}. \quad (7)$$

Реализуемое сцепление заблокированного колеса $f_{\text{тр}}$ (коэффициент сцепления заблокированного колеса ($\varphi_{\text{бл}}$) или коэффициент трения скольжения) – отношение любой вызванной трением скольжения продольной реакции опорной поверхности $R_x^{\text{тр}}$ к вертикальной реакции R_z , которые действуют на шину заблокированного колеса, скользящего относительно опорной поверхности

$$f_{\text{тр}} = \frac{R_x^{\text{тр}}}{R_z} \quad (8)$$

Коэффициент использования сил сцепления ε – отношение суммы усредненных продольных реакций опорной поверхности, действующих на затормаживаемые колеса транспортного средства при работе автоматизированной системы $\sum R_x^{\text{AS}}$, к максимально возможной сумме продольных реакций опорной поверхности $\sum R_x^{\text{max}}$, которая может быть создана между шинами и опорной поверхностью на вращающихся колесах транспортного средства в данных условиях торможения. Поскольку продольные реакции опорной поверхности измерить достаточно сложно, коэффициент использования силы сцепления может быть определен как отношение силы инерции транспортного средства, достигаемой при его торможении с работающей автоматизированной системой $P_{j\text{AS}}$, к максимально возможной силе инерции $P_{j\text{max}}$, которая может быть достигнута в заданных условиях при затормаживании колес транспортного средства без их блокирования. Коэффициент использования силы сцепления можно представить в виде зависимости

$$\varepsilon = \frac{\sum R_x^{\text{AS}}}{\sum R_x^{\text{max}}} = \frac{P_{j\text{AS}}}{P_{j\text{max}}} = \frac{j_{\text{AS}} m}{j_{\text{max}} m} = \frac{j_{\text{AS}}}{j_{\text{max}}}, \quad (9)$$

где j_{AS} – замедление транспортного средства, полученное при работе автоматизированной системы, обеспечивающей затормаживание колес транспортного средства без их блокирования, м/с^2 ; m – масса транспортного средства, кг.

Из [2] и [3] известно, что коэффициент использования силы сцепления при сертификации транспортного средства в разных погодноклиматических условиях на полигоне не должен выходить за пределы диапазона 0,75–1,10. Верхняя граница диапазона 1,10 установлена с учетом 10%-й погрешности определения максимально возможной суммарной тормозной силы $\sum R_x^{\text{max}}$, которая может быть реализована катящимися колесами транспортного средства.

Коэффициент торможения – отношение суммы продольных реакций $\sum R_x$ опорной поверхности, действующих на транспортное

средство при его торможении, к весу транспортного средства G_a

$$z = \frac{\sum R_x}{G_a} = \frac{P_j}{G_a} = \frac{j m}{m g} = \frac{j}{g}, \quad (10)$$

где P_j – сила инерции транспортного средства, Н.

Анализ [4–13] показал, что часто для обозначения одной и той же физической величины берутся разные буквы. Например, для обозначения коэффициента сцепления φ используют k , γ , μ или f_x^{max} , что вводит в заблуждение молодых ученых и исследователей, если они не являются специалистами в области изучения взаимодействия шины автомобильного колеса с поверхностью дорожного покрытия и не имеют личных экспериментальных исследований в этой сфере. Стоит также заметить, что один и тот же физический процесс по-разному представлен в нормативных документах, учебниках по теории автомобиля и научных публикациях, что тоже усложняет процесс понимания физического явления (взаимодействия шины автомобильного колеса транспортного средства с поверхностью дорожного покрытия) [1–20].

В качестве наглядного примера приведем экспериментальные исследования взаимодействия шины легкового автомобиля с опорной поверхностью (рис. 2b) [20] и теоретический расчет (рис. 2a), который регламентирован Правилами ЕЭК ООН № 13 [3, Приложение 10].

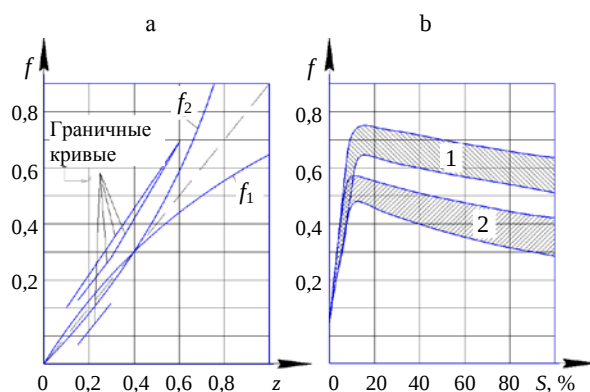


Рис. 2. Реализуемое сцепление f в зависимости от коэффициента: а – торможения z ; б – скольжения S колеса относительно поверхности дорожного покрытия

Fig. 2. Realized adhesion f depending on the coefficient: а – braking z ; б – sliding S of wheel relative to road surface

На рис. 2а изображены реализуемые сцепления передней f_1 и задней f_2 осей двухосного КТС в соответствии с [3], а на рис. 2б – диапазоны изменения реализуемого сцепления между шиной легкового автомобиля (диагональной конструкции) и асфальтовым дорожным покрытием при испытаниях на полигоне Научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института (НАМИ, Россия). При выполнении исследований на полигоне НАМИ колесо легкового автомобиля блокировалось в условиях взаимодействия шины с сухим асфальтовым покрытием (рис. 2б, заштрихованный диапазон 1) и в условиях взаимодействия с асфальтовым покрытием, которое имело слой воды до 3 мм (рис. 2б, диапазон 2). Результаты испытаний показывают, как меняется реализуемое сцепление в зависимости от степени скольжения шины колеса относительно опорной поверхности при постоянной нагрузке на колесо и различных сцепных условиях его движения.

Следует отметить, что не каждый исследователь понимает, что на рис. 2а, б показан один и тот же физический процесс – изменение реализуемого сцепления при качении колеса. Очевидно, что для адекватного сравнения процессов, изображенных на рис. 2, нужно рассматривать взаимодействие с опорной поверхностью одновременно как минимум четырех колес транспортного средства. Но в нашем случае представим, что мы рассматриваем велосипед, мопед или мотоцикл, которые имеют одно колесо спереди и одно сзади. В таком случае отличия между рис. 2а и рис. 2б заключаются только в том, что на первом рисунке кривые могут быть построены без ограничения по величине максимального реализуемого сцепления $f_x^{\max}$, а на втором они имеют такое ограничение.

Теоретический анализ процесса торможения транспортного средства

Процесс торможения колесного транспортного средства характеризуется величиной его замедления. Она, в свою очередь, зависит от

коэффициента торможения и определяется сложной математической зависимостью [1, 2], результат решения которой меняется с учетом режима движения КТС [9]:

– в ведомом режиме движения

$$z = f(f_0); \quad (11)$$

– в тормозном режиме при условии скольжения колес $S < 100\%$

$$z = f(f_x); \quad (12)$$

– в тормозном режиме при $S = 100\%$

$$z = f(f_{\text{тр}}). \quad (13)$$

Известно, что в ведомом режиме движения коэффициент торможения транспортного средства практически равен коэффициенту сопротивления качению ($z \cong f_0$).

В тормозном режиме при условии скольжения колес $S = 100\%$ коэффициент торможения КТС по величине равен реализуемому сцеплению заблокированного колеса ($z \cong f_{\text{тр}}$) (коэффициенту сцепления заблокированного колеса или коэффициенту трения скольжения).

В тормозном режиме при $S < 100\%$, поскольку практически всегда соблюдается неравенство $z \neq f_i \neq f_{\text{тр}}$, коэффициент торможения КТС определяется реализуемыми сцеплениями соответствующих осей транспортного средства и геометрическим расположением его центра тяжести в вертикальной плоскости относительно дорожного покрытия и в горизонтальной плоскости относительно точек контакта шин автомобильных колес с поверхностью дорожного покрытия [1, 2].

Если теоретически предположить, что существует автомобиль, у которого при торможении оси нагружены одинаково, шины имеют одинаковое давление в момент одинаковых нагрузок на оси, протектор на всех шинах – с одинаковым износом, количество шин на осях тоже одинаковое для обеспечения одинакового кулоновского трения между элементами протектора шины и дорожным покрытием, то можно сказать, что коэффициент торможения транспортного средства будет равен коэффициенту сцепления, поскольку автомобиль имеет одинаковые реализуемые сцепления всех осей

и симметричное расположение координаты центра тяжести между задними и передними его осями

$$z \cong f_x^{\max}. \quad (14)$$

Но такой случай практически невозможен для реальных транспортных средств, поскольку вес у них меняется в зависимости от их загрузки, а также возможно перераспределение веса между осями КТС, что не позволяет выполнить

равенство (14), а значит, практически всегда будет соблюдаться неравенство

$$z \neq f_x^{\max}. \quad (15)$$

В подтверждение сказанного выше, что у реальных транспортных средств $z \neq f_x^{\max} \neq f_{\text{тр}}$, приведем экспериментальные данные, изображенные на рис. 3, 4, которые получены в разное время учеными СССР, Европейского союза и стран СНГ [1, 2, 4–20].

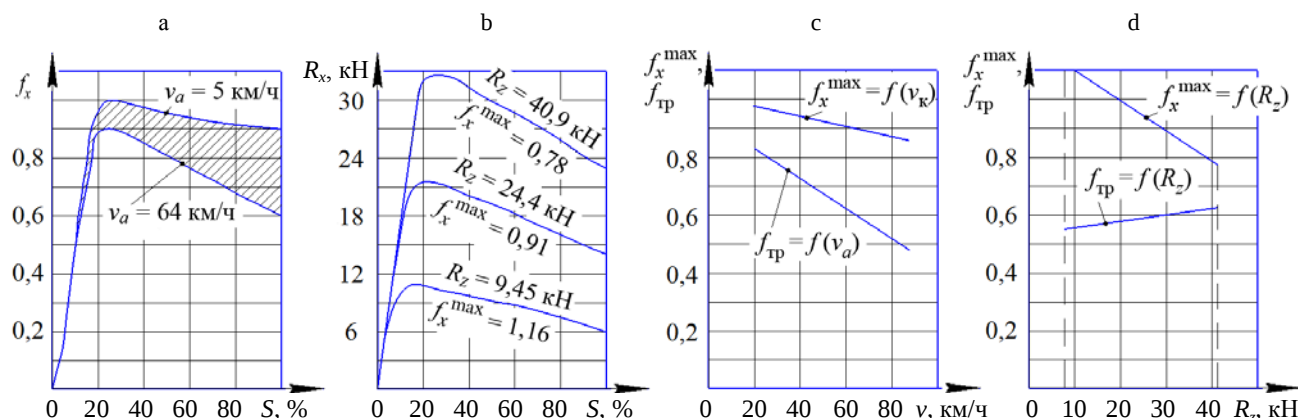


Рис. 3. Изменение реализуемого сцепления f_x на сухом асфальтовом покрытии [1, 2]: а – от начальной скорости торможения колесного транспортного средства (КТС) v_a и величины скольжения S ; б – от тормозной силы R_x и S при определенных нагрузках на шину R_z ; в – от скорости вращения колеса v_k и начальной скорости торможения КТС v_a ; д – от нагрузки на шину R_z

Fig. 3. Change in realized adhesion f_x on dry asphalt surface [1, 2]: а – due to initial speed of braking of wheeled vehicle v_a and slip values S ; б – due to braking force R_x and S at certain loads on pneumatic tire R_z ; в – due to wheel speed v_k and initial braking speed of vehicle v_a ; д – due to load on pneumatic tire R_z

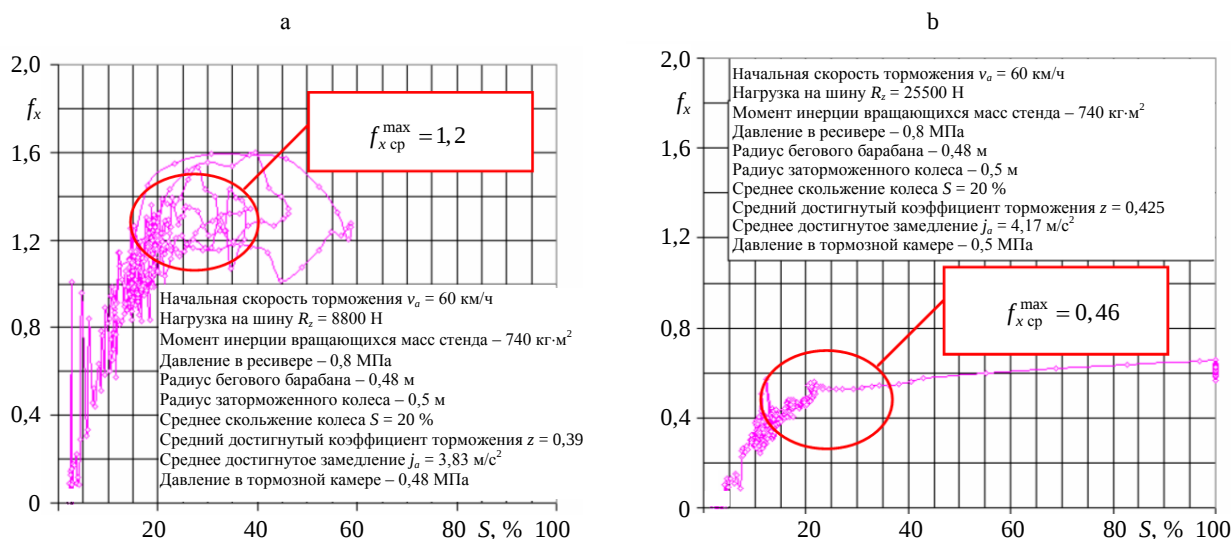


Рис. 4. Процессы торможения на покрытии с коэффициентом трения скольжения 0,45 [2] при прижатии колеса к поверхности бегового барабана стенда нагрузками $R_z = 8800$ Н (а) и $R_z = 25500$ Н (б)

Fig. 4. Braking processes on surface with sliding friction coefficient of 0.45 [2] when pressing the wheel to surface of running drum of the stand $R_z = 8800$ N (a) and $R_z = 25500$ N (b)

Следует также обратить внимание на то, что при использовании двойной ошиновки колес или шины с увеличенной шириной ее профиля значение максимального реализуемого сцепления (коэффициента сцепления) уменьшается вследствие уменьшения углов закручивания шины относительно поверхности дорожного покрытия, что отмечено в [2, 16, 17].

Анализ [2, 16] показал, что коэффициент торможения для каждого типа транспортного средства определяется по отдельным зависимостям. Так, для двухосных транспортных средств может быть использована зависимость, предложенная В. А. Иларионовым в [21]:

$$z = \frac{f_1 b_g + f_2 a_g}{L - h_g (f_1 - f_2)}, \quad (16)$$

где a_g , b_g , h_g – соответственно координаты расположения центра тяжести колесного транспортного средства относительно передней и задней осей и высота расположения центра тяжести над уровнем дороги, м; L – колесная база транспортного средства, м.

Аналогичные формуле (16) зависимости получены в [2, 16]. Для колесного транспортного средства с большим количеством осей уравнение (16) примет вид:

– при одной оси спереди и двух осях сзади:

$$z = \frac{f_{1y} + \left(\frac{f_{2-1}}{\lambda_{2-1}(L_a + y_1)} + \frac{f_{2-2}}{\lambda_{2-2}(L_a + y_2)} \right) L_a x}{L_a - h_g \left(f_1 - L_a \left(\frac{f_{2-1}}{\lambda_{2-1}(L_a + y_1)} + \frac{f_{2-2}}{\lambda_{2-2}(L_a + y_2)} \right) \right)}; \quad (17)$$

– для четырехосного КТС (две оси спереди, две сзади):

$$z = \frac{\left(\frac{f_{1-1}}{\lambda_{1-1}(L_a + x_1)} + \frac{f_{1-2}}{\lambda_{1-2}(L_a + x_2)} \right) y + \left(\frac{f_{2-1}}{\lambda_{2-1}(L_a + y_1)} + \frac{f_{2-2}}{\lambda_{2-2}(L_a + y_2)} \right) x}{1 - h_g \left(\left(\frac{f_{1-1}}{\lambda_{1-1}(L_a + x_1)} + \frac{f_{1-2}}{\lambda_{1-2}(L_a + x_2)} \right) - \left(\frac{f_{2-1}}{\lambda_{2-1}(L_a + y_1)} + \frac{f_{2-2}}{\lambda_{2-2}(L_a + y_2)} \right) \right)}; \quad (18)$$

– для КТС, имеющего шесть осей (три спереди, три сзади):

$$z = \frac{y \sum_{i=1}^3 \frac{f_{1-i}}{\lambda_{1-i}(L_a + x_i)} + x \sum_{i=1}^3 \frac{f_{2-i}}{\lambda_{2-i}(L_a + y_i)}}{1 - h_g \left(\sum_{i=1}^3 \frac{f_{1-i}}{\lambda_{1-i}(L_a + x_i)} - \sum_{i=1}^3 \frac{f_{2-i}}{\lambda_{2-i}(L_a + y_i)} \right)}, \quad (19)$$

где f_{1-i} , f_{2-i} – реализуемое сцепление на i -х передних и задних осях колесного транспортного средства; x , y –

координаты расположения условных передней и задней масс многоосного КТС относительно его центра тяжести, м; L_a – условная колесная база многоосного автомобиля ($L_a = x + y$) [16], м; λ_{1-i} , λ_{2-i} – коэффициент распределения массы между смежными передними и задними мостами КТС (i – порядковый номер соответствующего переднего или заднего моста); x_1 , x_2 , x_3 , y_1 , y_2 , y_3 – продольные координаты расположения мостов КТС относительно координат x и y , м.

Продольные координаты расположения мостов многоосного КТС относительно x и y можно определить, используя зависимости:

$$x_1 = a + b + d - k - x; \quad (20)$$

$$x_2 = a + b - k - x; \quad (21)$$

$$x_3 = a - k - x; \quad (22)$$

$$y_1 = k - y; \quad (23)$$

$$y_2 = c + k - y; \quad (24)$$

$$y_3 = c + e + k - y. \quad (25)$$

Значения k , x , y в (20)–(25) можно определить из условий статического распределения веса транспортного средства на соответствующие j -е передние и задние оси КТС по следующим зависимостям:

$$k = \frac{x \sum_{i=1}^3 R_{z1-i} - c \sum_{i=2}^3 R_{z2-i} - e R_{z2-3}}{\sum_{i=1}^3 R_{z2-i}}; \quad (26)$$

$$x = \frac{a \sum_{i=1}^3 R_{z2_i} + c \sum_{i=2}^3 R_{z2_i} + e R_{z2_3}}{mg} + \frac{\sum_{i=1}^3 R_{z2_i} \left(b \sum_{i=1}^2 R_{z1_i} + d R_{z1_1} \right)}{mg \sum_{i=1}^3 R_{z1_i}}; \quad (27)$$

$$y = \frac{a \sum_{i=1}^3 R_{z1_i} + b \sum_{i=1}^2 R_{z1_i} + d R_{z1_1}}{m \cdot g} + \frac{\sum_{i=1}^3 R_{z1_i} \left(c \sum_{i=2}^3 R_{z2_i} + e R_{z2_3} \right)}{mg \sum_{i=1}^3 R_{z2_i}}. \quad (28)$$

Константы a, b, c, d, e , входящие в (20)–(22), (24)–(28), – это расстояния между соответствующими мостами КТС (рис. 5).

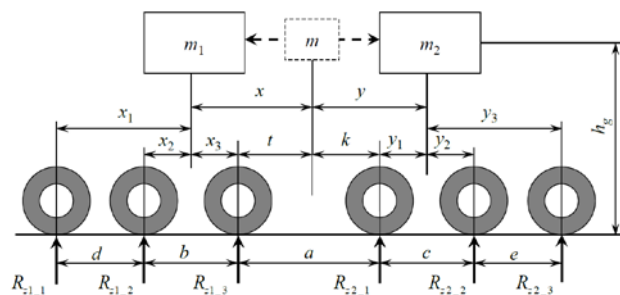


Рис. 5. Схема распределения условных передней и задней масс многоосного колесного транспортного средства относительно его центра тяжести

Fig. 5. Diagram of distribution of conditional front and rear masses of multi-axle wheeled vehicle relative to its center of gravity

Коэффициенты распределения веса между смежными передними или задними мостами КТС:

$$\lambda_{1_i} = \frac{\sum_{i=1}^3 R_{z1_i}}{R_{z1_i}}; \quad (29)$$

$$\lambda_{2_i} = \frac{\sum_{i=1}^3 R_{z2_i}}{R_{z2_i}}. \quad (30)$$

Таким образом, учитывая теоретические положения, изложенные выше, а также то, что современные КТС оборудуются автоматизированными системами, которые не допускают блокирования колес транспортного средства и увеличивают тем самым время торможения КТС в сравнении с идеализированным процессом торможения, остановочный путь транспортного средства можно определить, используя следующую формулу на основе одной из теоретических зависимостей (16)–(19):

$$S_{\text{ост}} = \frac{v_{\text{н}} - v_{\text{кон}}}{3,6} (t_1 + t_2 + 0,5t_3) + \frac{(v_{\text{н}} - v_{\text{кон}})^2}{25,92g\epsilon}, \quad (31)$$

где t_1 – время реакции водителя КТС на возникновение опасности, с.

При использовании зависимостей (16)–(19) нельзя задаваться постоянными значениями реализуемого сцепления – оно должно определяться расчетным путем на основе деформационных и жесткостных параметров пневматических шин [2, 17].

Опираясь на опыт исследований, проведенных в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете специалистами кафедры автомобилей имени А. Б. Гредескула, коэффициент использования силы сцепления автоматизированной системой регулирования тормозного усилия для расчетов с погрешностью не более 5 % можно принимать равным 0,83 независимо от условий эксплуатации транспортного средства или его массогабаритных параметров.

ВЫВОДЫ

1. Понимание физической сущности процесса реализации сил сцепления между шиной и опорной поверхностью – важное обстоятельство, от которого зависит результат исследования динамики движения колесного транспортного средства. Поэтому очевидно, что терминология имеет большое значение, особенно для начинающих исследователей в отрасли автомобилестроения.

2. Основываясь на результатах исследования, можно констатировать, что коэффициент торможения колесного транспортного средства в условиях качения его колес на пределе сцепных возможностей практически во всех случаях не равен коэффициенту сцепления, поскольку шины автомобиля из-за физической природы взаимодействия пары трения «шина – дорожное покрытие» реализовывают разные сцепления.

3. Коэффициент торможения транспортного средства независимо от количества его осей может быть определен расчетным способом с точностью до 5 % при помощи описанных в статье уравнений, основанных на распределении массы автомобиля между его смежными передними и задними мостами в статическом состоянии путем взвешивания соответствующих мостов на весоизмерительном комплексе.

4. Остановочный путь колесного транспортного средства, которое оборудовано автоматизированной системой регулирования тормозного усилия, может быть определен с точностью до 7 %, если принять среднее значение коэффициента использования силы сцепления $\varepsilon = 0,83$ для всех типов дорожного покрытия и условий эксплуатации транспортного средства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pacejka, H. B. *Tire and Vehicle Dynamics* / H. B. Pacejka. SAE.: N SAE0013, 2005. 620 p.
2. Реализация интеллектуальных функций в электронно-пневматическом тормозном управлении транспортных средств / А. Н. Туренко [и др.]. Харьков: ХНАДУ, 2015. 450 с.
3. Acts Adopted by Bodies Created by International Agreements. Regulation No 13 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) – Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles of Categories M, N and O with regard to Braking [Electronic Resource]: on Condition 30.09.2010. Mode of access: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:257:0001:0196:EN:PDF>.
4. On the Dependency of Friction on Load: Theory and Experiment / O. M. Braun [et al.] // *EPL (Europhysics Letters)*. 2016. Vol. 113, No 5. 56002 p. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/113/56002>.
5. Tire-Pavement Friction Characteristics with Elastic Properties of Asphalt Pavements / M. Yu [et al.] // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. 1123 p. <https://doi.org/10.3390/app7111123>.
6. Acosta, M. Road Friction Virtual Sensing: a Review of Estimation Techniques with Emphasis on Low Excitation Approaches / M. Acosta, S. Kanarachos, M. Blundell //

Applied Sciences. 2017. Vol. 7, No 12. 1230 p. <https://doi.org/10.3390/app7121230>.

7. Jin, L.-Q. Tire-Road Friction Estimation and Traction Control Strategy for Motorized Electric Vehicle / L.-Q. Jin, M. Ling, W. Yue // *PLoS ONE*. 2017. Vol. 6, No 12. P. 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179526>.
8. Системы автоматического регулирования и практическая реализация алгоритма управления их исполнительными механизмами / С. И. Ломака [и др.] // *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Транспортное машиностроение. 2009. Вып. 47. С. 9–18.
9. Khaleghian, S. A Technical Survey on Tire-Road Friction Estimation / S. Khaleghian, A. Emami, S. Taheri // *Friction*. 2017. Vol. 2, No 5. P. 123–146. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0151-0>.
10. Evaluating the Tire Wear Quantity and Differences Based on Vehicle and Road Coupling Method / B. Ma [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9, No 5. 13 p. <https://doi.org/10.1177/1687814017700063>.
11. Measurement on Friction Coefficients of Tire Grounding Surface in Arbitrary Directions under High-Load / T. Ise [et al.] // *Experimental Mechanics*. 2017. Vol. 57, No 9. P. 1383–1393. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0309-8>.
12. Akutagawa, K. Technology for Reducing Tire Rolling Resistance / K. Akutagawa // *Tribology Online*. 2017. Vol. 12, No 3. P. 99–102. <https://doi.org/10.2474/trol.12.99>.
13. Renski, A. Analysis of the Influence of the Drive Force Distribution between Axles on an Automobile Stability in its Curvilinear Motion / A. Renski // *Conat 2016: International Congress of Automotive and Transport Engineering*, 2017. P. 55–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_6.
14. Grinchuk, P. S. On a Thermodynamic Mechanism of Dissipation of Mechanical Energy in Porous Elastomers as Applied to the Problem of Heating of Automobile Tires / P. S. Grinchuk, A. I. Shnip // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. Vol. 89, No 6. P. 1358–1364. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1501-x>.
15. Леонтьев, Д. Н. Усовершенствованный алгоритм управления АБС / Д. Н. Леонтьев // *Автомобильная промышленность*. 2010. № 9. С. 25–28.
16. Леонтьев, Д. Н. Способ определения замедления многоосного автомобиля на основе реализуемых сцеплений его колес и расположения координаты центра масс / Д. Н. Леонтьев, А. Н. Туренко, В. А. Богомолов // *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету*. 2016. Вып. 75. С. 13–17.
17. Leontiev, D. Specifics of Automobile Dual Wheels Interaction with the Supporting Surface / D. Leontiev, E. Don // *Automobile Transport*. 2016. Vol. 39. P. 74–79.
18. Zhang, X. A Hierarchical Estimator Development for Estimation of Tire-Road Friction Coefficient / X. Zhang, D. Göhlich // *PLoS ONE*. 2017. Vol. 2, No 12. P. 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171085>.
19. Slip Control of Electric Vehicle Based on Tire-Road Friction Coefficient Estimation / G. Cui [et al.] // *Hindawi. Mathematical Problems in Engineering*. 2017. 8 p. <https://doi.org/10.1155/2017/3035124>.
20. Ракляр, А. М. Исследование f - S -диаграмм дорог автополигона / А. М. Ракляр. М., 1978. 24 с.

21. Иларионов, В. А. Анализ тормозной динамичности автобуса / В. А. Иларионов, И. К. Пчелин // Труды ВКЭИавтобуспрома. Львов, 1975. С. 95–110.

Поступила 04.05.2018

Подписана в печать 10.08.2018

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. Pacejka H. B. (2005) *Tire and Vehicle Dynamics*. SAE Intentional. 620.
2. Turenko A. N., Bogomolov V. A., Klimenko V. I., Ryzhikh L. A., Leont'ev D. N., Krasnyuk A. N., Mikhalevich N. G. (2015) *Implementation of Intelligence Functions in Electronic-Pneumatic Brake Control of Vehicles*. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University. 450 (in Russian).
3. *Acts Adopted by Bodies Created by International Agreements*. Regulation No 13 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) – Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles of Categories M, N and O with Regard to Braking: on Condition 30.09.2010. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:257:0001:0196:EN:PDF>.
4. Braun O. M., Steenwyk B., Warhadpande A., Persson B. N. J. (2016) On the Dependency of Friction on Load: Theory and Experiment. *EPL (Europhysics Letters)*, 113 (5), 56002. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/113/56002>.
5. Yu M., Wu G., Kong L., Tang Y. (2017) Tire-Pavement Friction Characteristics with Elastic Properties of Asphalt Pavements. *Applied Sciences*, 7 (11), 1123. <https://doi.org/10.3390/app7111123>.
6. Acosta M., Kanarachos S., Blundell M. (2017) Road Friction Virtual Sensing: a Review of Estimation Techniques with Emphasis on Low Excitation Approaches. *Applied Sciences*, 7 (12), 1230. <https://doi.org/10.3390/app7121230>.
7. Jin L.-Q., Ling M., Yue W. (2017) Tire-Road Friction Estimation and Traction Control Strategy for Motorized Electric Vehicle. *PLoS ONE*, 6 (12), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179526>.
8. Lomaka S. I., Ryzhikh I. A., Leont'ev D. N., Cheban A. A., Krasnyuk A. N. (2009) Automatic Control Systems and Practical Implementation of the Control Algorithm for their Executive Mechanisms. *Vestnik Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta "KhPI". Seriya: Transportnoe Mashinostroenie* [Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Transport Engineering], 47, 9–18 (in Russian).
9. Khaleghian S., Emami A., Taheri S. (2017) A Technical Survey on Tire-Road Friction Estimation. *Friction*, 2 (5), 123–146. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0151-0>.
10. Ma B., Xu H. G., Chen Y., Lin M. Y. (2017) Evaluating the Tire Wear Quantity and Differences Based on Vehicle and Road Coupling Method. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (5), 13. <https://doi.org/10.1177/1687814017700063>.
11. Ise T., Higuchi M., Suzuki Y., Tachiya H. (2017) Measurement on Friction Coefficients of Tire Grounding Surface in Arbitrary Directions under High-Load. *Experimental Mechanics*, 57 (9), 1383–1393. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0309-8>.
12. Akutagawa K. (2017) Technology for Reducing Tire Rolling Resistance. *Tribology Online*, 12 (3), 99–102. <https://doi.org/10.2474/trol.12.99>.
13. Renski A. (2017) Analysis of the Influence of the Drive Force Distribution between Axles on an Automobile Stability in its Curvilinear Motion. *Conat 2016: International Congress of Automotive and Transport Engineering*, 55–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_6.
14. Grinchuk P. S., Shnip A. I. (2016) On a Thermodynamic Mechanism of Dissipation of Mechanical Energy in Porous Elastomers as Applied to the Problem of Heating of Automobile Tires. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89 (6), 1358–1364. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1501-x>.
15. Leontiev D. N. (2010) Improved Algorithm for Controlling Anti-Lock Braking System. *Avtomobilnaya Promyshlennost* [Automotive Industry], (9), 25–28 (in Russian).
16. Leontiev D. N., Turenko A. N., Bogomolov V. A. (2016) Method for Determining Deceleration of Multi-Axle Vehicle on the Basis of Realized Adhesions of its Wheels and Location of Mass Center Coordinate. *Visnik Kharkiv's'kogo Natsional'nogo Avtomobil'no-Dorozhn'ogo Universitetu = Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 75, 13–17 (in Russian).
17. Leontiev D., Don E. (2016) Specifics of Automobile Dual Wheels Interaction with the Supporting Surface. *Automobile Transport*, 39, 74–79.
18. Zhang X., Göhlich D. (2017) A Hierarchical Estimator Development for Estimation of Tire-Road Friction Coefficient. *PLoS ONE*, 2 (12), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171085>.
19. Cui G., Dou J., Li S., Zhao X., Lu X., Yu Z. (2017) Slip Control of Electric Vehicle Based on Tire-Road Friction Coefficient Estimation. *Hindawi. Mathematical Problems in Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1155/2017/3035124>.
20. Raklyar A. M. (1978) *Investigation of f-s-Diagrams of Autopolygon Roads*. Moscow. 24 (in Russian).
21. Ilarionov V. A., Pchelin I. K. (1975) Analysis of Bus Braking Dynamics. *Trudy VKEIavtobusproma* [Proceedings of All-Union Design and Experimental Institute of Bus Industry]. Lviv, 95–110 (in Russian).

Received: 04.05.2018

Accepted: 10.08.2018

Published online: 28.01.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-73-81>

УДК 338

Формирование логистического подхода к экономическому развитию дорожного хозяйства Республики Беларусь

Докт. экон. наук, проф. Р. Б. Ивуть¹⁾, канд. экон. наук, доц. И. М. Царенкова²⁾

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

²⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье определены перспективные направления в экономическом развитии дорожного хозяйства, обеспечивающие рациональное использование инвестиций и совершенствование процессов строительства, реконструкции и ремонта автомобильных дорог на основе логистического подхода, а также способствующие организации безопасных и экономически выгодных перевозок грузов и пассажиров, необходимых для устойчивого экономического развития страны и повышения ее транзитного потенциала. Комплекс основных логистических принципов дополнен прикладными, применение которых позволит управлять циклом экономической деятельности в дорожном хозяйстве как единым целым. При анализе особенностей логистического подхода в исследуемой сфере установлено, что иерархия построения логистических систем обусловлена применением различных схем управляющих воздействий в зависимости от специфики функционирующих потоков каждого уровня. В основе управления макрологистической системой дорожного хозяйства лежит необходимость повышения конкурентоспособности автотранспортных услуг посредством улучшения обслуживания транспортных потоков, что ставится в зависимость от уровня развития автодорожной инфраструктуры и построения системы изменения ее состояния. Фундамент микрологистических систем формируют ресурсные потоки дорожно-строительного производства, воспринимаемые в системном единстве. Основная идея логистического подхода к экономическому развитию дорожного хозяйства проявляется через рациональное планирование (макроуровень) и реализацию (микроуровень) мероприятий по развитию и эксплуатации дорог. Требования пользователей лежат в основе выбора направлений по улучшению их состояния, что увязывает организацию работ на дорожных объектах со стратегией развития транспортно-логистической системы страны. Организация транспортировки грузов и пассажиров по автомобильным дорогам согласуется с процессами производства дорожных работ, что в совокупности делает их оптимальными для каждой из сфер и формируемой системы в целом. Логистический подход обеспечивает необходимую связующую основу в управлении межотраслевыми потоковыми процессами оказания автотранспортных услуг и дорожной деятельностью, а также внутриотраслевыми – между дорожными службами в составе логистической системы.

Ключевые слова: автомобильная дорога, дорожная деятельность, логистическая система, методология, потоки, принципы, элементы, цепь поставок

Для цитирования: Ивуть, Р. Б. Формирование логистического подхода к экономическому развитию дорожного хозяйства Республики Беларусь / Р. Б. Ивуть, И. М. Царенкова // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 73–81. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-73-81>

Formation of Logistics Approach to Economic Development of Road Sector of the Republic of Belarus

R. B. Ivut¹⁾, I. M. Tsarenkova²⁾

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

²⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The paper identifies promising directions in the economic development of the road sector, ensuring the rational use of investments and improving the processes of construction, reconstruction and repair of roads based on the logistics

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

approach, as well as contributing to the organization of safe and economically profitable transportation of goods and passengers necessary for the sustainable economic development of the country and increasing its transit potential. The set of basic logistics principles is supplemented with applied ones, the application of which will allow to manage the cycle of economic activity in the road sector as a whole. Describing the features of the logistics approach in the field under study, it has been established that the hierarchy of the construction of logistics systems is due to the use of various schemes of control actions, depending on the specifics of the functioning flows of each level. The management of the macro-logistic road management system is based on the need to increase the competitiveness of road transport services by improving the maintenance of transport flows, which is dependent on the level of development of the road infrastructure and the construction of a system for changing its state. The foundation of micro-logistic systems is formed by the resource flows of road construction production, perceived in a systemic unity. The main idea of the logistics approach to the economic development of the road economy is manifested through rational planning (macro-level) and implementation (micro-level) of measures for the development and operation of roads. The requirements of users are the basis for the choice of directions for improving their condition, which links the organization of work on road facilities with the strategy for the development of the transport and logistics system of the country. Organization of transportation of goods and passengers by road is consistent with the processes of road works, which together makes them optimal for each of the areas and the formed system as a whole. The logistics approach provides the necessary connecting framework in the management of intersectoral flow processes for the provision of road transport services and road activities, as well as intra-industry – between road services as part of the logistics system.

Keywords: highway, road activity, logistics system, methodology, flows, principles, elements, supply chain

For citation: Ivut R. B., Tsarenkova I. M. (2022) Formation of Logistics Approach to Economic Development of Road Sector of the Republic of Belarus. *Science and Technique*. 21 (1), 73–81. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-73-81> (in Russian)

Введение

Дорожное хозяйство обеспечивает реализацию государственной дорожно-транспортной политики в области дорожной деятельности. Его работа способствует формированию национальной сети автомобильных дорог как целостной монолитной материальной основы транспортно-логистической системы страны. Поставленные ООН задачи в рамках девятой цели устойчивого развития «Создание стойкой инфраструктуры, содействие всеохватной и устойчивой индустриализации и инновациям» по проблемам развития качественной, надежной, устойчивой и стойкой инфраструктуры, включая региональную и трансграничную, в целях поддержки экономического развития, социального единства и благополучия людей требуют комплексного решения, весомый вклад в достижение которого вносит эффективная деятельность дорожного хозяйства [1]. Результаты многочисленных исследований подтверждают значимость влияния расширения и развития входящей в его состав автодорожной инфраструктуры на социально-экономические показатели регионов [2–7].

Долгосрочный прогноз развития экономики Республики Беларусь, выполненный авторами [8], свидетельствует о том, что при эффективном использовании ресурсов и преимуществ интеграции в ЕАЭС Беларусь с 2020 по 2050 г. будет поступательно улучшать свои позиции в мировом рейтинге по уровню жизни населе-

ния. Это потребует достижения значения показателя плотности автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием к 2030 г. не менее 365,2 км в расчете на 1000 км² территории страны [1]. При этом уровень автомобилизации рынка грузовых перевозок, как и в случае с легковыми автомобилями (рост на 15,7 % за последние пять лет), непрерывно повышается. Начиная с 2000 г., количество грузовых транспортных средств увеличилось на 175 %, а прирост прицепов и полуприцепов по сравнению с предыдущим годом составил 5 % [9]. Указанные тенденции усиливают воздействие тяжелых грузовых транспортных средств на дорожные покрытия, вызывая ускоренное ухудшение транспортно-эксплуатационного состояния, и предъявляют новые требования к их качеству.

В проекте Государственной программы «Дороги Беларуси» на 2021–2025 гг. отмечаются следующие проблемы развития дорожного хозяйства:

- недостаточное соответствие транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог общего пользования нормативным требованиям и потребностям экономики в автомобильных перевозках;
- несоответствие мостовых сооружений требуемым параметрам по грузоподъемности и габариту;
- функционирование отдельных элементов интеллектуальной транспортной системы на фрагментарной основе;

– недостаточные объемы инвестиций в развитие и восстановление ежегодного износа автомобильных дорог;

– невысокая несущая способность дорожных покрытий [10].

Что касается последней проблемы, в целях обеспечения сохранности эксплуатируемого дорожного фонда ежегодно вводятся сезонные ограничения передвижения по дорогам для грузового автомобильного транспорта в весенний и летний периоды [11]. В текущем году протяженность участков республиканских автомобильных дорог, в отношении которых в весенний период ограничиваются нагрузки на оси транспортных средств, составляет 59,7 % от их общей длины. Из них максимально допустимая нагрузка на одиночную ось 6 т установлена для 20,1 % таких дорог, 8 т – для 39,6 %. В летний период максимальная нагрузка на ось не должна превышать более 6 т на всех республиканских трассах с асфальтобетонным покрытием в дневные часы при температуре воздуха выше 25 °С. Исключения составляют только 12,1 % от общей длины республиканских автомобильных дорог. Недостаток мощности автодорожной инфраструктуры сопряжен с падением средней скорости движения автотранспорта против 80–100 км/ч за рубежом, где грузы перемещаются за сутки на расстояние 700–1300 км. Закономерным результатом будет рост транспортной составляющей в конечной цене продукции и услуг, которая в США и Европе не превышает 7–10 % [9]. Объективные причины невозможности кардинального улучшения транспортно-эксплуатационного состояния большинства автомобильных дорог, ввиду ограниченности финансовых ресурсов, доля которых в составе республиканского бюджета в последние годы колеблется на уровне 3 %, подводят к необходимости поиска новых подходов, совершенствования существующих теоретико-методологических основ и концептуальных положений экономического развития дорожного хозяйства.

Особенности экономического развития на национальном и отраслевом уровнях рассматриваются в работах многих белорусских ученых: Р. Б. Ивутя, С. С. Полоника, А. А. Быкова, А. В. Данильченко, А. В. Шимова, А. Г. Шумилина, А. М. Филиппова и др. [5, 8, 12–16]. Принимая во внимание глубину проводимых исследований, установлено, что дорожное хозяйство в качестве объекта системно и комплексно не рассматривается. Вместе с тем про-

веденные теоретические изыскания позволяют интерпретировать его развитие как процесс целенаправленных последовательных качественных функциональных изменений в сфере планирования дорожных работ и организации их производства при управлении автодорожной инфраструктурой с соблюдением принципов рационального использования финансовых средств и недопущения (предотвращения) необоснованных затрат пользователей при движении по дорогам. Данный подход представляет возможность связать дорожную деятельность и автомобильные перевозки грузов и пассажиров с экономическим ростом, обосновывая в дальнейшем мероприятия по повышению качественного уровня автодорожной инфраструктуры как фактор поддержания долгосрочного устойчивого и сбалансированного экономического развития.

Логистический подход к экономическому развитию дорожного хозяйства

Позиционирование логистики как новой методологии оптимизации и управления интегрированными ресурсными потоками в среде экономического пространства позволяет применить ее научный аппарат для исследования дорожного хозяйства как логистической системы и последовательного решения задач более рационального использования ресурсов, вовлекаемых в происходящие экономические процессы. Логистический подход заключается в управлении системой как единым целым, подводя ее к качественно новому уровню путем комплексного улучшения всех элементов, исследуемых в постоянном взаимодействии, тесно связанных между собой отношениями преемственности и иерархии построения при достижении поставленных целей развития.

Работа дорожного хозяйства на территориально разбросанных объектах связана с решением организационно-технических, социально-экономических, институциональных и экологических проблем, расширяющих диапазон и глубину взаимосвязей, образующихся в логистических системах, что требует уточнения данного понятия относительно представленной специфики. Логистическая система в дорожном хозяйстве рассматривается как сложная структурированная организационно завершенная экономическая система, обладающая свойствами динамической устойчивости и адаптивности, состоящая из взаимосвязанных в едином

процессе управления и упорядоченных по движению материальных и других видов потоков элементов-звеньев, совокупность которых, границы и задачи функционирования обусловлены целями внутренней и внешней среды [17].

Цели развития такой системы изучаются через призму достижения планируемых приоритетов государственных программ развития транспортного комплекса, логистической системы страны и оптимизации основных опера-

ционных процессов в дорожном хозяйстве, что и определяет ее предназначение. Стратегическое целеполагание связано с решениями, последствия которых, как было отмечено ранее, сказываются в течение длительного времени, отмена или исправление которых повлечет за собой дополнительные финансовые затраты и потери в экономике [18]. Формирование методологии логистического подхода к управлению дорожным хозяйством представлено на рис. 1.

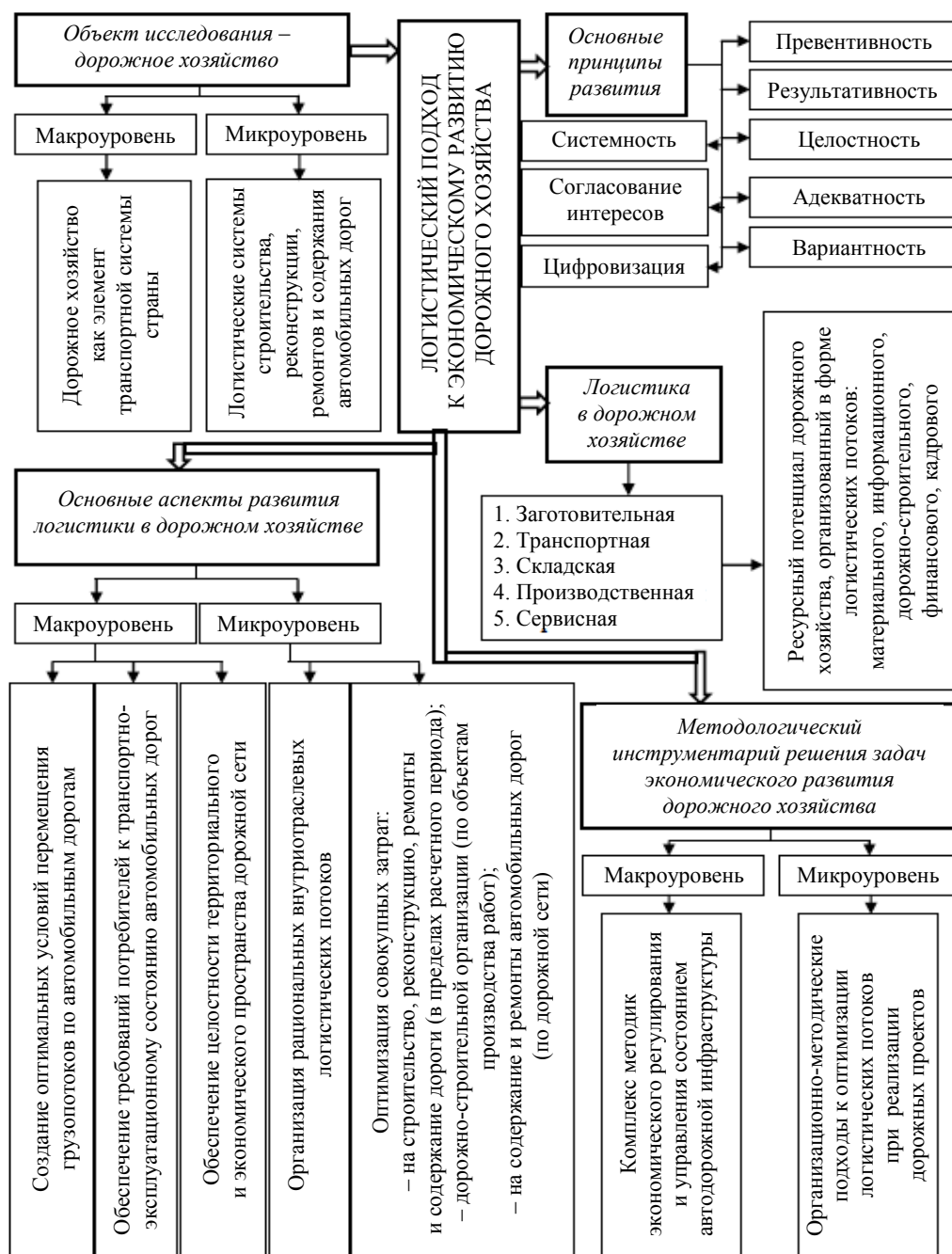


Рис. 1. Формирование методологии логистического подхода к управлению дорожным хозяйством

Fig. 1. Formation of methodology for logistics approach to road management

Экономические виды деятельности дорожного хозяйства, представляющие в комплексе систему организационно-технических мероприятий и строительных, восстановительных, ремонтных, профилактических и других работ, осуществляемых на дорогах, при логистическом подходе исследуются как основной составляющий элемент обслуживающей инфраструктуры рынка транспортно-логистических услуг, т. е. реализация дорожных проектов связывается с организацией доставки грузов и пассажиров посредством информационного обеспечения. Информационная поддержка принимаемых решений базируется на цифровых технологиях, что обеспечит принципиально новые возможности при управлении автодорожной инфраструктурой, проектировании и производстве работ на дорожных объектах. Объединение разрозненных производственных процессов в систему путем цифровой интеграции позволит повысить надежность в области проектирования, планирования, производства, эксплуатации и логистики [19]. Тогда логистическая система дорожного хозяйства на макроуровне представляет собой упорядоченную совокупность звеньев, объединенных между собой для создания оптимальных условий перемещения грузопотоков автомобильного транспорта путем поставки (развитие, капитальный ремонт) и продвижения (ремонт и содержание) готового продукта (автомобильной дороги) пользователям на основе концепции логистики. В такой постановке макрологистическая система дорожного хозяйства создает структурно-композиционную целостность дорожной сети, объединенной общностью стратегических целей и задач функционирования рынка транспортно-логистических услуг.

При этом основополагающие принципы, лежащие в основе логистического подхода (целостность, системность, синергичность, эмерджентность, надежность, научность, динамичность и др.), необходимо дополнить прикладными, которых следует придерживаться при развитии исследуемой отрасли. Так, принцип результативности предполагает комплексную оценку эффектов, возникающих в логистической системе дорожного хозяйства, а также на предприятиях различных отраслей экономики в связи с улучшением дорожных условий (транс-

портный и внетранспортный эффекты) и выражающихся, в конечном итоге, увеличением доли этих отраслей в формировании валового внутреннего продукта. Положительный результат достигается за счет компенсации затрат дорожных организаций эффектом, получаемым в транспортной и других отраслях экономики. Принцип адекватности отражает соответствие способов согласования экономических интересов дорожного хозяйства и пользователей автомобильными дорогами, качественного уровня дорожных конструкций, технологических процессов их строительства существующему уровню развития и потребностям автомобильного транспорта.

Принцип превентивности предусматривает, что при управлении в логистической системе осуществляется выявление и предотвращение причин возникновения, а также недопущение возможных отрицательных последствий ухудшения транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог. Принцип вариантности допускает различные конфигурации цепей поставок в процессе создания и реализации продукции дорожного хозяйства, но при этом предполагается, что альтернативы необходимо рассматривать с позиции минимизации потерь пользователей автомобильными дорогами. Принцип согласованности интересов использован для выделения ориентиров развития дорожного хозяйства и его логистических систем, которые заданы системами более высокого уровня и складывающимися внешними условиями. В соответствии с этим выделены такие ориентиры, как интересы национальные, приоритетные экономические и социальные.

Проведенные исследования позволяют заключить, что при формировании макрологистической системы дорожного хозяйства важно сконцентрировать внимание на учете комплекса условий, свойственных сложившейся практике функционирования действующих организационных структур управления. Взаимозависимость поставленных целей, основных задач, возникающих в системе при ее функционировании (Π_i), многообразия видов услуг, оказываемых на дорожно-строительном рынке (Y_j) при оптимальном использовании ресурсов в макрологистической системе, представлены в виде укрупненной схемы на рис. 2.

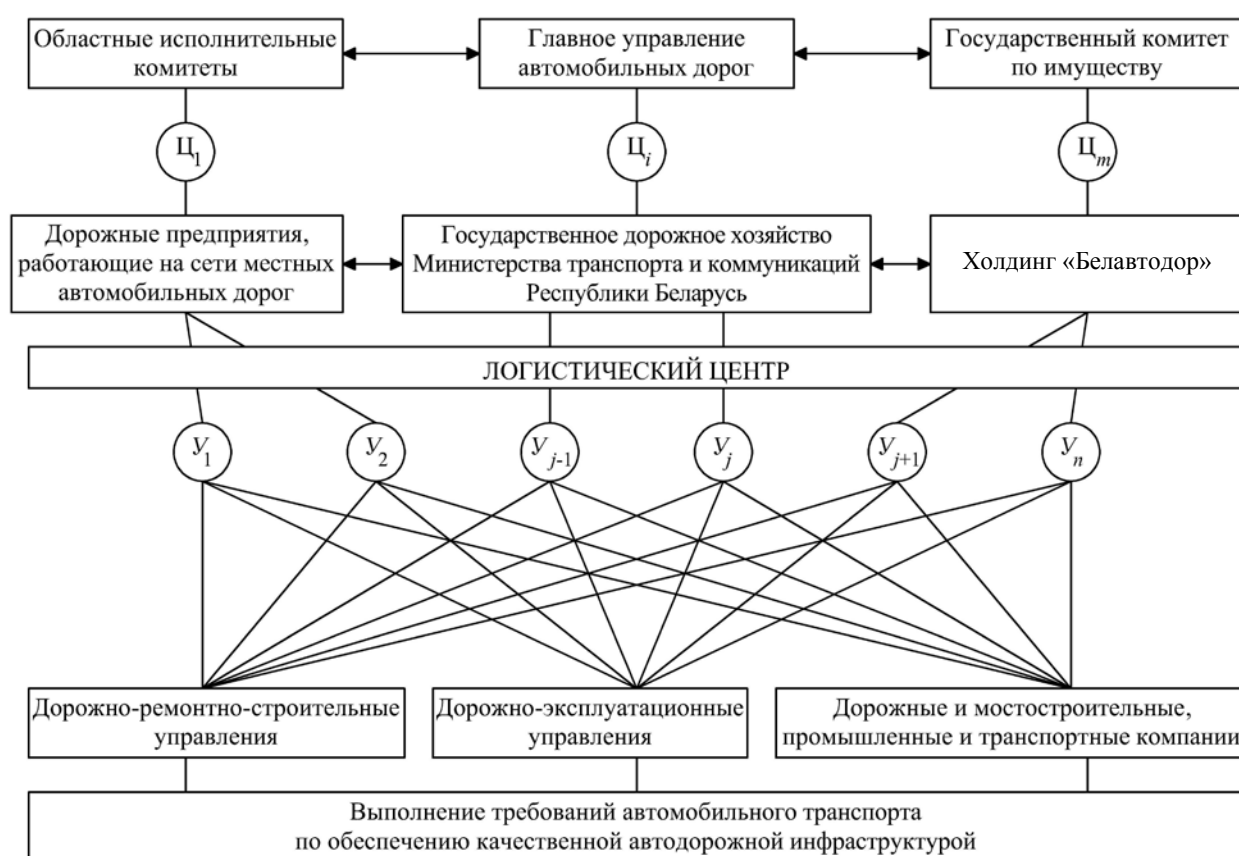


Рис. 2. Структура макрологистической системы дорожного хозяйства
Fig. 2. Structure of macro-logistics system of road economy

Вопрос о субъектном составе был исследован методом декомпозиции существующей системы управления. Отмечена ограниченность необходимых компонентов. В частности, практически отсутствуют неизбежно сопровождающие реализацию логистического подхода специализированные службы, обладающие необходимой профессиональной подготовкой и соответствующим квалификационным уровнем. Как показал проведенный анализ, существует недостаточное взаимодействие между подразделениями, которые реализуют логистические функции (закупка, транспортировка, складирование, распределение и др.). Материальное обеспечение технологических процессов строительства дорог часто осуществляется под воздействием производственных требований и не учитывает принципы экономической эффективности. Ввиду отсутствия координирующего логистического элемента в составе участников дорожных проектов, формируются, как правило, невзаимосвязанные схемы транс-

портировки, и отсутствует возможность консолидированной поставки материальных ресурсов с последующим распределением по участкам дорожной сети.

В связи с этим требуется усилить состав участников логистических систем в части введения экспертов по логистике в штат предприятий либо развития системы аутсорсинга с целью привлечения сторонних специалистов в случае необходимости решения логистических задач, а также сформировать логистический координационный центр, регулирующий работу системы на основе использования информационно-коммуникационных и технико-технологических средств в условиях взаимодействия различных процессов при строительстве, реконструкции, ремонтах и эксплуатации автомобильных дорог.

Логистическая система макроуровня предусматривает функционирование в едином комплексе предприятий дорожного хозяйства в рамках ресурсного обеспечения и эффектив-

ной реализации программы работ на всех дорожных объектах. Вместе с тем логистические системы микроуровня – это внутрипроизводственные логистические системы в рамках отдельных предприятий и дорожных объектов, в состав которых входят технологически связанные производства, объединенные единой инфраструктурой. В микрологистических системах происходят ускорение процесса прохождения логистического потока на объекты производства работ, снижение запасов строительных материалов, сокращение периода организационно-технической подготовки к строительству. Традиционно циркулирующие в дорожном хозяйстве схемы поставки основных дорожно-строительных материалов трансформируются, используя современный научно-методологический аппарат логистики, оптимизируя расходы за счет возможности определения стратегических контрагентов, рационального выбора поставщиков, постоянного сотрудничества с ними в цепи поставок в режиме реального времени.

Процесс организации строительства автомобильной дороги стоит рассматривать комплексно, не ограничиваясь рамками одного предприятия. Логистическая система строительства представляет собой пространственное сочетание предприятий, средств и путей сообщения, функционально объединенных логистическими цепями. Субъектами дорожно-строительного рынка, генерирующими логистические цепи, выступают: производители сырья (карьеры каменных материалов, нефтедобывающие станции, грунтовые карьеры), материалов (щебёночные, нефтеперерабатывающие заводы, предприятия по производству железобетонных изделий и металлических конструкций) и полуфабрикатов (асфальтобетонные и цементобетонные заводы, битумные базы), склады для их хранения, поставщики, финансовые учреждения (банки, биржи, фонды), транспортные организации, потребители (дорожно-строительные и ремонтно-строительные тресты, дорожно-строительные управления, дорожные ремонтно-строительные управления, управления механизации). Тогда цепь поставок в дорожном строительстве представляет собой сеть функционально взаимосвязанных логистических систем и заинтересованных предприятий, которые посредством связей между заказчиками, подрядчиками, поставщиками и другими уча-

стниками строительного производства, а также различных процессов и действий формируют добавленную стоимость в сфере доставки материальных ресурсов для дорожного строительства, оказания услуг по реализации транспортных и технологических процессов и дальнейшего «сопровождения» готового участка дороги пользователям с необходимой ценностью. При этом отдельные участки одной и той же автомобильной дороги для улучшения транспортно-эксплуатационного состояния подвергаются в разное время различным видам строительного-монтажных работ, т. е. в долгосрочном периоде являются вовлеченными в производственные циклы многих дорожных организаций и выступают результатом их работы, что входит в предмет сервисной логистики.

Таким образом, на основании проведенного исследования можно утверждать, что применение логистического подхода служит источником возникновения синергетического эффекта в процессе работы логистических систем в дорожном хозяйстве. Выражением указанного эффекта является возникновение в системе дорожного хозяйства возможности поддержания стабильного состояния автодорожной инфраструктуры и его последовательного улучшения при рациональном уровне затрат, а также достижение за счет этого долгосрочного эффекта в транспортной и других отраслях экономики.

ВЫВОДЫ

1. Формирование логистических систем при трансформации внутренних процессов на основе логистических принципов является одним из необходимых условий экономического развития дорожного хозяйства. Использование логистического подхода в исследуемой области задает принципиально новое системное видение процессов строительства, реконструкции, ремонтов и эксплуатации автомобильных дорог, роли их участников в обеспечении результативности автомобильного транспорта.

2. Основные субъекты дорожного хозяйства, взаимодействующие на дорожно-строительном рынке в целях создания условий для непрерывного и безопасного перемещения транспортно-логистических потоков по автомобильным дорогам, представлены в виде макрологистической системы дорожного хозяйства, которая входит в состав единой транспортно-логисти-

ческой системы страны. Впервые в логистике ставится комплексная задача по эффективной организации транспортных потоков, связанной с предоставлением возможности выбора условий движения с установленными скоростями и нагрузками по дорогам с разными транспортно-эксплуатационными характеристиками с момента взаимодействия с логистической системой дорожного хозяйства до выхода из нее после завершения перевозки грузов и пассажиров. Интеграционный компонент предполагает выделение общей функции управления движением транспортных потоков с контролем экономических последствий дорожной деятельности при функционировании инфраструктурной базы, дифференцированной по запросам автомобильного транспорта.

3. На микроуровне внутрипроизводственные логистические системы дорожно-строительных организаций объединяются в составе логистических систем строительства, реконструкции и ремонтов по участкам автомобильных дорог, что позволяет управлять материальными и сопутствующими им потоками как единым целым без отрыва от поставщиков исходного сырья и потребителей готовой продукции (участки производства работ) в процессе ресурсного обеспечения и производства работ в целях повышения их эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/SDG/Naz_perechen_pokas_SDG/tse1-9/. Дата доступа: 01.04.2021.
2. Патракеева, О. Ю. Модели оценки влияния транспортных проектов на экономическое развитие: методологические и прикладные особенности / О. Ю. Патракеева // Экономический анализ: теория и практика. 2018. Т. 17, № 5. С. 871–885.
3. Meersman, H. The Contribution of Transport Infrastructure to Economic Activity: the Case of Belgium / H. Meersman, M. Nazemzadeh // Case Studies on Transport Policy. 2017. Vol. 5, Iss. 2. P. 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.03.009>
4. Elburz, Z. Public Infrastructure and Regional Growth: Lessons from Meta-Analysis / Z. Elburz, P. Nijkamp, E. Pels // Journal of Transport Geography. 2017. Vol. 58. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.10.013>
5. Ивуть, Р. Б. Оценка влияния транспортно-логистической инфраструктуры регионов Республики Беларусь на ее социально-экономические показатели / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, П. И. Лапковская // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 2. С. 93–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-93-100>.
6. Гольская, Ю. Н. Оценка влияния транспорта на социально-экономическое развитие регионов / Ю. Н. Гольская, И. А. Кузнецова // Известия Байкальского государственного университета. 2010. № 5. С. 61–64.
7. Рослякова, Н. А. Оценка взаимосвязи параметров транспортного комплекса региона и его экономического роста / Н. А. Рослякова // Вестник СибАДИ. 2013. Т. 33, № 5. С. 156–162.
8. Полоник, С. С. Долгосрочный прогноз развития экономики Республики Беларусь / С. С. Полоник, М. А. Смолярова // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 16-го Междунар. науч. сем., проводимого в рамках 18-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», Минск, 26 марта 2020 г. Минск: Право и экономика, 2020. С. 34–37.
9. Царенкова, И. М. Современные тенденции развития рынка международных автомобильных перевозок Республики Беларусь / И. М. Царенкова, И. А. Масловская // Рынок транспортных услуг (проблемы повышения эффективности): междунар. сб. науч. тр. / Белорус. гос. ун-т трансп.; под ред. В. Г. Гизатуллиной. Гомель, 2019. Вып. 12. С. 160–166.
10. Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mintrans.gov.by/ru/obshchestvennye-obsuzhdeniya/>. Дата доступа: 31.03.2021.
11. О введении в 2021 году временных ограничений нагрузок на оси транспортных средств, самоходных машин [Электронный ресурс]: постановление Мин-ва трансп. и коммуникац. Респ. Беларусь от 1 марта 2021 г. № 4 // РУП «Белдорцентр». Режим доступа: <http://beldor.centr.by/2021/03/18-03-21-2/>. Дата доступа: 01.04.2021.
12. Быков, А. А. Декомпозиция факторов экономического роста, основанного на спросе, с применением методологии межотраслевого баланса / А. А. Быков, Т. В. Шаблинская // Белорусский экономический журнал. 2020. № 1. С. 4–21.
13. Данильченко, А. В. О развитии креативной экономики в Республике Беларусь / А. В. Данильченко, Е. В. Бертош // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 15-го Междунар. науч. сем., проводимого в рамках 17-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», Минск, 24–25 янв. 2019 г. Минск: Право и экономика, 2019. С. 18–19.
14. Шимов, А. В. Развитие экономики Беларуси: состояние, проблемы, абрис перспективной трансформации / А. В. Шимов // Белорусский экономический журнал. 2014. Т. 67, № 2. С. 4–15.
15. Шумилин, А. Г. Состояние и перспективы технологического развития для экономики Республики Беларусь / А. Г. Шумилин // Бизнес в законе. 2015. № 6. С. 246–252.
16. Филиппов, А. М. Отраслевая политика экономического развития: методология, теория, практика / А. М. Филиппов. Минск: Белор. гос. экон. ун-т, 2019. 48 с.
17. Царенкова, И. М. Интеграция дорожного хозяйства и автомобильного транспорта в логистических системах / И. М. Царенкова, Р. Б. Ивуть. Гомель: БелГУТ, 2018. 194 с.
18. Царенкова, И. М. Развитие макрологистической системы дорожного хозяйства: теоретико-методологические основы / И. М. Царенкова // Право. Экономика. Психология. 2018. Т. 10, № 2. С. 30–36.

19. Царенкова, И. М. Возможности цифровой трансформации дорожного хозяйства / И. М. Царенкова // Вестник НГИЭИ. 2020. Т. 109, № 6. С. 57–64.

Поступила 15.04.2021

Подписана в печать 22.06.2021

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Available at: http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/SDG/Naz_perechen_pokas_SDG/tse-9/. (Accessed 1 April 2021) (in Russian).
2. Patrakeeva O. Yu. (2018) Models to Assess the Effects of Transport Projects on Economic Growth: Specific Aspects of Methodology and Practice. *Ekonomicheskii Analiz: Teoriya i Praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*, 17 (5), 871–885 (in Russian).
3. Meersman H., Nazemzadeh M. (2017) The Contribution of Transport Infrastructure to Economic Activity: the Case of Belgium. *Case Studies on Transport Policy*, 5 (2), 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.03.009>.
4. Elburz Z., Nijkamp P. (2017) E. Pels Public Infrastructure and Regional Growth: Lessons from Meta-Analysis. *Journal of Transport Geography*, 58, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.10.013>.
5. Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I. (2020) Estimation of Transport and Logistics Infrastructure Impact of Regions in the Republic of Belarus on its Socio-Economic Indicators. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (2), 93–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-93-100>.
6. Golskaya Yu. N., Kouznetsova I. A. (2010) Evaluation of Transport Influence on Socio-Economic Development of Regions. *Izvestiya Baikalskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of Baikal State University*, (5), 61–64 (in Russian).
7. Roslyakova N. A. (2013) Evaluation of Inter-Relation Between Parameters of Transport Complex in the Region and its Economic Growth. *Vestnik SibADI = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 33 (5), 156–162 (in Russian).
8. Polonik S. S., Smolyarova M. A. (2020) Long-Term Forecast of the Development of the Economy of the Republic of Belarus. *Mirovaya Ekonomika i Biznes-Administrirovanie Malykh i Srednikh Predpriyatii: Materialy 16-go Mezhdunar. Nauch. Sem., Provodimogo v Ramkakh 18-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. "Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike"*, Minsk, 26 Marta 2020 g. [World Economy and Business Administration of Small and Medium Enterprises: Proceedings of the 16th International Scientific Seminar held Within the Framework of the 18th International Scientific and Technical Conference "Science for Education, Production, Economy", Minsk, March 26, 2020]. Minsk, Pravo i Ekonomika, 34–37 (in Russian).
9. Tsarenkova I. M., Maslovskaya I. A. (2019) Modern Trends in the Development of the International Road Transport Market of the Republic of Belarus. *Rynok Transportnykh Usług (Problemy Povysheniya Effektivnosti): Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr.* [The Market of Transport Services (Problems of Increasing Efficiency): International Collection of Scientific Papers]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 12, 160–166 (in Russian).
10. Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus. Available at: <http://mintrans.gov.by/ru/obshchestvennye-obsuzhdeniya/> (Accessed 31 March 2021) (in Russian).
11. About Introduction in 2021 of Temporary Restrictions on Axle Loads of Vehicles, Self-Propelled Machines: Resolution of Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus Dated on March 1, 2021. No 4. *Republican Unitary Enterprise [RUE] "Beldortsentr"*. Available at: <http://beldor.centrb.by/2021/03/18-03-21-2/> (Accessed 1 April 2021) (in Russian).
12. Bykov A. A., Shablinskaya T. V. (2020) Decomposition of Factors of Economic Growth Based on Demand, Using the Methodology of Intersectoral Balance. *Belorusskii Ekonomicheskii Zhurnal = Belarusian Economic Journal*, (1), 4–21 (in Russian).
13. Danilchenko A. V., Bertosh E. V. (2019) On Development of Creative Economy in the Republic of Belarus. *Mirovaya Ekonomika i Biznes-Administrirovanie Malykh i Srednikh Predpriyatii: Materialy 15-go Mezhdunar. Nauch. Sem., Provodimogo v Ramkakh 17-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. "Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike"*, Minsk, 24–25 Yanv. 2019 g. [World Economy and Business Administration of Small and Medium Enterprises: Proceedings of the 15th International Scientific Seminar Held within the Framework of the 17th International Scientific and Technical Conference "Science for Education, Production, Economy", Minsk, Jan. 24–25, 2019]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ., 18–19 (in Russian).
14. Shimov A. V. (2014) Development of the Belarusian Economy: State, Problems, Outline of Perspective Transformation. *Belorusskii Ekonomicheskii Zhurnal = Belarusian Economic Journal*, 67 (2), 4–15 (in Russian).
15. Shumilin A. G. (2015) State and Prospects of Technological Development for Economy of the Republic of Belarus. *Biznes v Zakone = Business in Law*, (6), 246–252 (in Russian).
16. Filiptsov A. M. (2019) *Branch Policy of Economic Development: Methodology, Theory, Practice*. Minsk, Belarus State Economic University. 48 (in Russian).
17. Tsarenkova I. M., Ivut R. B. (2018) *Integration of Road Facilities and Road Transport in Logistics Systems*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 194 (in Russian).
18. Tsarenkova I. M. (2018) Development of the Macrologistic System of Road Management: Theoretical and Methodological Foundations. *Pravo. Ekonomika. Psikhologiya = Law. Economy. Psychology*, 10 (2), 30–36 (in Russian).
19. Tsarenkova I. M. (2020) Possibilities for Digital Transformation of Road Economy. *Vestnik NGIEI [Bulletin of Nizhegorodsky State Engineering-Economic University]*, 109 (6), 57–64 (in Russian).

Received: 15.04.2021

Accepted: 22.06.2021

Published online: 28.01.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-82-88>

УДК 620.92 (597)

Структура и организация регионального кластера возобновляемых источников энергии во Вьетнаме

Канд. экон. наук, доц. Т. Ф. Манцерава¹⁾, асп. Нго Ань Туэт²⁾

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

²⁾Университет электроэнергетики (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам)

© Белорусский национальный технический университет, 2022

Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Региональный кластер возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является промышленным кластером и имеет особенности энергетической отрасли. Поэтому ему необходимы собственный механизм и структура формирования для обеспечения комплексного развития. В статье рассматривается структура регионального кластера ВИЭ для Вьетнама и предлагается аппарат управления ею. С учетом опыта других стран обосновано формирование структуры регионального кластера ВИЭ для условий Вьетнама с целью обеспечения социально-экономического развития страны и ее энергосистемы, решения экологических проблем, поощрения инвестиций в энергетику. Структура регионального кластера ВИЭ построена и проанализирована в соответствии с фактическими условиями использования ВИЭ во Вьетнаме и включает в себя пять субъектов: профильных и непрофильных участников кластера, поставщиков, потребителей, конкурентов. Построена схема, описывающая структуру кластера, представлены роли участников. Рассмотрены организационная и управленческая структуры регионального кластера, соответствующие конкретным условиям Вьетнама. Управленческая структура регионального кластера Вьетнама состоит из высшего управляющего комитета, фасилитатора, менеджера проекта и рабочих групп. Обязанности сторон организационной структуры сформулированы таким образом, чтобы отразить их участие в работе регионального кластера ВИЭ. Структура регионального кластера ВИЭ способна показать взаимоотношения между участниками внутри и вне кластера. Организационная структура регионального кластера и стратегия его развития являются основами построения политики в области возобновляемых источников энергии страны.

Ключевые слова: структура кластера, организация кластера, возобновляемые источники энергии, кластер, регион

Для цитирования: Манцерава, Т. Ф. Структура и организация регионального кластера возобновляемых источников энергии во Вьетнаме / Т. Ф. Манцерава, Нго Ань Туэт // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 82–88. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-82-88>

Structure and Organization of Regional Renewable Energy Cluster in Vietnam

T. F. Manceroava¹⁾, Ngo Anh Tuyet²⁾

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

²⁾Electric Power University (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam)

Abstract. The regional cluster of renewable energy sources (RES) is an industrial cluster and has the characteristics of the energy industry. Therefore, it needs its own mechanism and structure of formation to ensure integrated development. The paper examines the structure of the regional RES cluster for Vietnam and proposes an apparatus for managing it. Taking into account the experience of other countries, the formation of the structure of the regional RES cluster for the conditions of Vietnam has been substantiated in order to ensure the socio-economic development of the country and its energy system,

Адрес для переписки

Манцерава Татьяна Феликсовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-35
eoe@bntu.by

Address for correspondence

Manceroava Tatiana F.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-35
eoe@bntu.by

built and analyzed in accordance with the actual conditions for the use of renewable energy sources in Vietnam and includes five components: profile and non-profile members of the cluster, suppliers, consumers, competitors. A diagram describing the structure of the cluster is illustrated in detail, the roles of the participants are presented. The organizational and management structures of the regional cluster, which correspond to the specific conditions of Vietnam are considered in the paper. The management structure of the Vietnam regional cluster consists of a senior steering committee, facilitator, project manager and working groups. The responsibilities of the participants in the organizational structure are formulated in such a way as to reflect their role in the work of the regional renewable energy cluster. The structure of a regional RES cluster is able to show the relationship between participants inside and outside of the cluster. The organizational structure of the regional cluster and the strategy for its development are the foundations for building a policy in the field of renewable energy sources in the country.

Keywords: structure of cluster, organization of cluster, renewable energy sources, cluster, region

For citation: Mancerova T. F., Ngo Anh Tuyet (2022) Structure and Organization of Regional Renewable Energy Cluster in Vietnam. *Science and Technique*. 21 (1), 82–88. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-82-88> (in Russian)

Введение

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) становятся приоритетными во многих государствах мира, поскольку практически не ухудшают экологическое состояние природной среды. Развитие ВИЭ должно осуществляться с учетом имеющихся социально-экономических условий и энергетического потенциала страны. Одновременно необходимо анализировать все факторы воздействия при формировании и развитии соответствующего кластера, в данном случае – кластера ВИЭ (с поддержкой его на государственном уровне).

При формировании регионального кластера ВИЭ во Вьетнаме рекомендуется учитывать следующие положения [1].

1. Создание регионального кластера ВИЭ должно быть обусловлено не только прямыми экономическими (прибыль от вложенных инвестиций), но и возможными социально-экономическими выгодами (получение преимуществ для национальной экономики, обеспечение поступательного социально-экономического развития, решение острых проблем экологии).

2. Во Вьетнаме вследствие относительно низких тарифов на ВИЭ инвестиции в эту сферу могут быть привлекательными при полном учете всех позитивных факторов развития данных источников энергии, что осуществимо в процессе создания региональных кластеров. Формирование кластера будет стимулировать выработку привилегированных условий и поддержку предприятий, принимающих в нем участие.

3. Необходимо учитывать особенности развития топливно-энергетического комплекса Вьетнама:

– обострение проблемы нехватки сырья для производства электроэнергии вследствие истощения источников угля (с 2015 г. осуществляется импорт угля по неустойчивым ценам);

– производство электроэнергии из традиционных источников существенно загрязняет окружающую атмосферу, что не соответствует тенденции создания зеленой экономики в стране;

– расширение выработки традиционных видов электроэнергии связано с дополнительными затратами из-за ужесточения требований по утилизации производственных отходов;

– правительство страны стремится ограничить выбросы загрязняющих веществ, поэтому разрабатывает меры по стимулированию развития ВИЭ, что будет способствовать привлечению инвестиций в данную сферу;

– начиная с 2015 г. во Вьетнаме формируется конкурентный рынок электроэнергетики, что дает возможность ВИЭ конкурировать с традиционными источниками энергии.

4. Учитывая опыт создания кластеров в различных странах [1–4], во Вьетнаме целесообразно выбрать собственный механизм для формирования и развития ВИЭ на основе анализа фактического положения в топливно-энергетическом комплексе и его взаимосвязи с социально-экономическим развитием страны.

Структура регионального кластера возобновляемых источников энергии для Вьетнама

В теории и практике экономических исследований по формированию кластеров наиболее известными авторами являются Д. Ф. Рутко, А. А. Батталова, М. Портер, В. И. Волков,

Н. Н. Котляров, Е. К. Хусаинова, М. А. Суржиков [5–12], а также Г. Д. Боуш, Ю. Г. Лаврикова, Рахими Шахло, Е. В. Маркушина. При этом надо отметить, что методические разработки А. А. Батталовой в наибольшей степени подходят для создания кластера ВИЭ во Вьетнаме. Однако ее методика разработана применительно к региональным кластерам топливно-энергетического комплекса России. Для создания модели кластера А. А. Батталова в качестве его ядра предлагает взять вертикально интегрированную нефтяную компанию, которая существует в данном регионе, а не только ВИЭ [6]. Поэтому при разработке кластера для условий Вьетнама следует учитывать не только особенности возобновляемых источников энергии, но и вьетнамского региона.

В соответствии с теорией экономического кластера и условиями развития кластера во Вьетнаме предлагается структура регионального кластера ВИЭ. Она состоит из пяти субъектов:

– профильные участники кластера;

– непрофильные участники кластера;
– поставщики;
– потребители;
– конкуренты.

Перечисленные субъекты, находящиеся в тесном взаимодействии и связанные с реальными условиями ВИЭ Вьетнама, более развернуто представлены на рис. 1 [1].

Непрофильные участники кластера исполняют роль вспомогательных подразделений по основным направлениям его функционирования, разрабатывая методы взаимосвязи между участниками, тем самым участвуя в управлении их деятельностью. Правительство формирует политику, направленную на поддержку бизнеса предприятий с целью привлечения инвестиций в производственную и предпринимательскую деятельность кластера. Учебные заведения, научно-исследовательские институты, университеты, научные ассоциации исследуют и применяют научные технологии, а в случае необходимости – реформируют их.

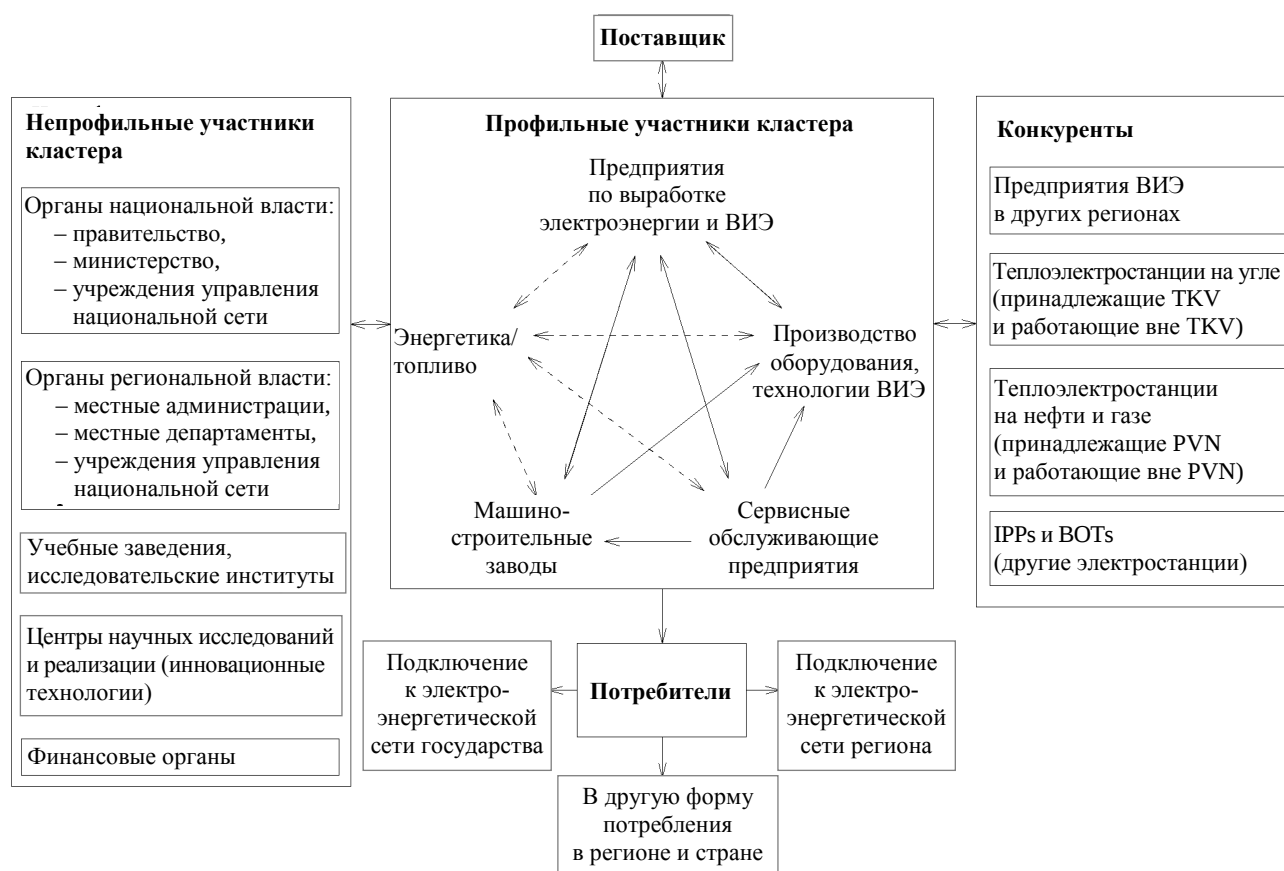


Рис. 1. Структура регионального кластера возобновляемых источников энергии для Вьетнама

Fig. 1. Regional cluster structure of renewable energy sources for Vietnam

Поставщики являются органами обеспечения материалами и топливом для выработки электроэнергии. Однако большинство видов ВИЭ не имеют поставщиков, поскольку используют биомассу.

Потребители – это электроэнергетическая система национальной и (или) региональной сетей. Кластеры должны осуществлять производство электроэнергии для национальной (региональной) сети по плану, утвержденному учреждением управления национальной (региональной) сети. Кроме того, кластер может предоставлять другие продукты и услуги, такие как тепловая энергия, биотопливо, консультационные услуги по энергосбережению для иных потребителей.

Конкуренты – предприятия, производящие электроэнергию из возобновляемых источников в других регионах. А еще конкуренты – это предприятия и заводы по производству электроэнергии из традиционных ископаемых источников энергии, а также независимые электростанции в пределах или за пределами региона.

Организационная структура регионального кластера

В разных странах формирование организационной структуры кластера может принимать различные формы. В одних требуется создание юридического лица в виде коммерческой или некоммерческой структуры, в других нет. Некоммерческая структура с господдержкой всегда предпочтительнее коммерческой. Юридическая некоммерческая структура объединяет партнеров кластера, регулирует взаимоотношения между ними и определяет степень вовлеченности в кластерный проект, в том числе финансовую ответственность участников. А создается она для управления и представления интересов кластера. Управленческая структура кластера обычно состоит из управляющего комитета, фасилитатора (лица, обеспечивающего успешность кластерных коммуникаций), руководителя проекта, рабочих групп и пр. [12].

На основе разработанной в некоторых странах мира стратегии развития кластера и в соответствии с конкретными условиями Вьетнама в статье представлена организационная струк-

тура регионального кластера Вьетнама, куда включены высший управляющий комитет, фасилитатор (управляющий координатор), менеджер проектов и рабочие группы.

Задача высшего управляющего комитета – поддержка общей деятельности и политики развития кластера. Для оценки эффективности функционирования кластера и разработки направления политики поддержки бизнеса заседания комитета рекомендуется проводить как минимум один раз в год. В состав высшего управляющего комитета должны входить представители организаций, включая высококвалифицированных экспертов в области энергетического кластера. Они способны оценивать возможность внедрения новых энергосберегающих технологий, предлагать технические решения и критерии отбора потенциальных кандидатов для реализации проектов зеленой энергетики, а также помогать создавать оптимальные схемы финансирования. Комитет осуществляет поддержку на уровне государства, способствует решению проблем эффективного применения технологий в энергетике и экологии, защищает права участников и сотрудников кластера.

Фасилитаторами кластера, как правило, являются представитель регионального развития, агентство поддержки бизнеса или специалист по созданию кластерной инициативы. В их функции входят планирование и организация работы в кластере, расширение возможности профильных участников, построение сетей сотрудничества, координация с менеджерами проектов. Фасилитатор осуществляет правовую, информационную, консультативную и рекламную поддержку развития рынка в сфере энергосбережения, возобновляемой энергетики и сопутствующих этой деятельности услуг.

Реализацией проектов в рамках кластерной инициативы и прочих проектов, связанных с деятельностью кластера, занимается менеджер проектов.

Рабочие группы координируют и ответственны за эффективное выполнение плана стратегии развития кластера. Они также имеют право разрабатывать и перестраивать первоначальную форму рабочих групп. Корректировке могут быть подвергнуты группы: ресурсов данных; исследования технологии; исследования

рынка (купля-продажа); управления финансовыми ресурсами. Группа управления рабочими идеями становится управляющим координатором кластера, группа проектирования проекта – частью менеджера проектов.

Как правило, формирование организационной структуры кластеров происходит на паритетной основе. Участие в кластере государственных, частных, инновационных организаций, образовательных и исследовательских институтов, предпринимательских объединений должно строиться на принципе открытости и доверия.

Рекомендации по формированию и развитию регионального кластера возобновляемых источников энергии

Региональная кластерная политика в области ВИЭ – это комплекс регулирующих мер, осуществляемых государственными и местными органами власти с целью повышения конкурентоспособности ВИЭ в экономике региона и страны путем создания условий для предприятий кластера в:

- 1) эффективном организационном развитии;
- 2) координации деятельности;
- 3) обеспечении эффективной методической, информационно-консультационной, образовательной, экономической, инвестиционной, инновационной и технологической поддержки.

Вьетнам уже имел опыт построения и эксплуатации промышленных кластеров, состоящих из большого количества предприятий различных отраслей. Политика поддержки промышленных кластеров в этой стране в настоящее время основана на обеспечении эффективной инфраструктуры (дороги, системы электроснабжения, водоснабжение). Проекты по созданию промышленных кластеров облагаются по льготной ставке земельного налога и налога на прибыль, получают финансовую помощь. Региональный кластер ВИЭ – это промышленный кластер с характеристиками производства и поставки электроэнергии. Имея особенности энергетической отрасли, кластер ВИЭ может рассчитывать на участие в льготных программах государства. Однако региональному кластеру ВИЭ необходимы собственный механизм и структура формирования для

обеспечения комплексного развития прикладных исследований, внедрения новых технологий, эффективного использования ВИЭ и бесперебойного электроснабжения.

Согласно исследованиям М. Портера [7], на ранних этапах создания кластера главная задача государства – улучшение инфраструктуры и исключение неблагоприятных условий. А далее его роль должна состоять в устранении ограничений в области развития инноваций.

При реализации государственной политики в отношении регионального кластера ВИЭ применяется метод управления top-down-top. Это объясняется тем, что энергетика является частью инфраструктуры национальной экономики и представляет особую важность. В связи с этим необходима комплексная и последовательная реализация политики от высших исполнительных органов до местных. Следующий момент, который нужно отметить, – неспособность ВИЭ сегодня открыто конкурировать с существующими традиционными источниками энергии. Поэтому в процессе формирования и работы кластера ВИЭ требуется тесное взаимодействие с инвесторами проекта. Кроме того, для эффективной реализации методов поддержки кластера ВИЭ необходима быстрая и прямая связь между предприятиями кластера и органами власти.

Перечислим основные мероприятия региональной кластерной политики ВИЭ для Вьетнама.

1. На уровне государства:

а) обеспечение благоприятных условий развития кластеров:

– поддержка капитальных вложений из государственного бюджета, планирование затрат на развитие кластера ВИЭ (включая генеральные и детальные планы), создание базы данных и использование научного подхода при формировании кластера;

– инвестирование в развитие региональной инфраструктуры кластера (технической, транспортной, телекоммуникационной, социальной);

– предоставление специально оборудованных помещений для концентрации участников кластера (технопарк);

– создание инвестиционных фондов для исследований и инновационных разработок, развитие вспомогательных производств (механи-

ческие работы, ремонтно-техническое обслуживание и др.) с целью снижения операционных затрат и усиления рынка вспомогательных производств;

- формирование и обеспечение благоприятного налогового режима для участников кластера (быстрое выполнение административных процедур, обеспечение легкости и прозрачности при начислении и сборе налогов);

- планирование и реализация программ по привлечению бизнеса (инвестиционных проектов) в региональные кластеры ВИЭ. Приоритетное финансирование кластерных проектов, облегчение доступа к источникам кредитов и специальным программам в стране и за рубежом для развития ВИЭ;

б) содействие реализации кластерных проектов для повышения операционной эффективности работы и взаимодействия предприятий:

- финансовая поддержка при возникновении потребности в создании отдельных проектов кластера, а также при наличии возможности выделения средств из государственного бюджета (ежегодно государство выделяет определенные суммы на реализацию проектов в кластере, включая проекты вспомогательных кластеров);

- предоставление списков специализированных инвестиционных проектов кластеров; разработка и реализация программ на всех уровнях управления. Поощрение перспективных проектов в регионе, особенно тех, которые связаны с технологиями освоения ВИЭ, локализацией энергосберегающих проектов и производством технологического оборудования;

- разработка стандартов качества продуктов и услуг кластера (внедрение международных и национальных стандартов), стандартов качества управления кластерными предприятиями, проведение ресурсо- и энергоаудита, мониторинг эффективности кластера и осуществление периодических проверок;

- укрепление сотрудничества в кластере в области технологий и коммерции (совместные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, разработка долгосрочных партнерских исследовательских программ, стимулирование закупок инновационной продукции кластера, развитие специализированной инновационной инфраструктуры);

- вывод продуктов и услуг предприятий кластера на внешние рынки (поддержка маркетинга продукции кластера).

2. На уровне региона – обеспечение благоприятных условий для развития кластера в регионе:

- поддержка финансирования кластера из местных бюджетов исходя из их финансовых возможностей; народные комитеты провинций и городов центрального подчинения устанавливают объем средств местных бюджетов и направляют их для финансирования объектов инфраструктуры внутри и вне кластера;

- поддержка цен и льготных ставок налога: помимо государственной поддержки развития ВИЭ в целом, необходима поддержка на региональном уровне в соответствии с целями кластера и региона. Например, финансирование затрат на защиту окружающей среды, на благоустройство и озеленение региона (эти затраты до сих пор не учитывались при создании промышленных кластеров во Вьетнаме).

3. Для обеспечения эффективности использования бюджетных средств необходимы периодические проверки на местном и государственном уровнях, а также осуществление обратной связи с предприятиями кластера:

- обеспечение взаимодействия трех компонентов кластера (государство, наука, предприятия) посредством семинаров, конференций, консультаций;

- создание ревизионной группы для ежегодной проверки деятельности кластера в течение трех-пяти лет и содействия в определении общей стратегии развития кластера;

- формулирование высшей политики государства в отношении кластеров ВИЭ, а также политики в регионах;

- подготовка профессиональных кадров для регионального кластера ВИЭ.

ВЫВОДЫ

1. В соответствии с теорией экономического кластера и условиями развития его во Вьетнаме предлагается структура регионального кластера возобновляемых источников энергии, которая состоит из пяти субъектов: профильных и непрофильных участников кластера, поставщиков, потребителей, конкурентов.

2. Представлена организационная структура регионального кластера возобновляемых источников энергии Вьетнама, куда должны входить высший управляющий комитет, фасилитатор, менеджер проектов, рабочие группы.

3. Определенная структура регионального кластера возобновляемых источников энергии, способная выражать отношения между его участниками, организационная структура кластера и стратегия его развития являются основами для разработки рекомендаций и политики в области возобновляемых источников энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нго Ань Туэт. Формирование модели энергетического кластера для возобновляемых источников энергии во Вьетнаме / Нго Ань Туэт // Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. / пред. редкол. С. Ю. Солодовников. Минск: БНТУ, 2017. Вып. 5. С. 421–434.
2. Нго Ань Туэт. Методика оценки возможности создания регионального кластера возобновляемых источников энергии во Вьетнаме / Нго Ань Туэт // Вестник Иннопрома. Серия: Наука. Инновации. Производство. 2017. № 1. С. 86–94.
3. Смородинская, Н. Территориальные инновационные кластеры: мировые ориентиры и российские реалии [Электронный ресурс] / Н. Смородинская. Режим доступа: http://inecon.org/docs/Smorodinskaya_2013.pdf.
4. Методические рекомендации по реализации кластерной политики в субъектах Российской Федерации [Электронный ресурс] // Министерство экономического развития Российской Федерации. Режим доступа: <http://economy.gov.ru/minrec/activity/sections/innovations/development/doc1248781537747>.
5. Рутко, Д. Ф. Кластеры в Европейском союзе: механизм формирования и тенденции развития / Д. Ф. Рутко. Минск, 2015. 29 с.
6. Батталова, А. А. Механизм развития топливно-энергетического комплекса на основе создания кластера / А. А. Батталова. Уфа, 2013. 22 с.
7. Портер, М. Международная конкуренция / М. Портер; под ред. В. Д. Щетинина. М.: Междунар. отнош., 1993. 896 с.
8. Волков, В. И. Кластер как инструмент повышения конкурентоспособности и инновационной активности регионов / В. И. Волков, Е. А. Малицкая // Самоуправление. 2012. № 10. С. 10–14.
9. Батталова, А. А. Диагностика регионального кластера в топливно-энергетической промышленности / А. А. Батталова // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2012. № 11. С. 44–48.
10. Котляров, Н. Н. Зарубежный опыт формирования кластерных систем / Н. Н. Котляров, Л. В. Левченко // Мировая экономика и международные экономические отношения. Экономические науки. 2014. Т. 119, № 10. С. 105–110.
11. Хусаинова, Е. К. Оценка экономической эффективности энергосберегающей деятельности нефтеперерабатывающих предприятий / Е. К. Хусаинова. СПб., 2015. 115 с.
12. Суржиков, М. А. Кластеризация как средство повышения потенциала внешнеэкономической деятельности региона / М. А. Суржиков // Учет и статистика. 2012. Т. 25, № 1. С. 90–96.

Поступила 09.09.2021

Подписана в печать 23.11.2021

Опубликована онлайн 28.01.2022

REFERENCES

1. Ngo Anh Tuyet (2017) Formation of Energy Cluster Model for Renewable Energy Sources in Vietnam. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnya: Sb. Nauch. St.* [Economics Today. Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 5, 421–434 (in Russian).
2. Ngo Anh Tuyet (2017) Methodology for Assessing Possibility of Creating Regional Cluster of Renewable Energy Sources in Vietnam. *Vestnik Innoproma. Seriya: Nauka. Innovatsii. Proizvodstvo* [Bulletin of Innoprom. Series: Science. Innovation. Production], (1), 86–94 (in Russian).
3. Smorodinskaya N. (2013) *Territorial Innovation Clusters: World Landmarks and Russian Realities*. Available at: http://inecon.org/docs/Smorodinskaya_2013.pdf (in Russian).
4. Methodological Recommendations for Implementation of Cluster Policy in the Constituent entities of the Russian Federation. *Ministry of Economic Development of the Russian Federation*. Available at: <http://economy.gov.ru/minrec/activity/sections/innovations/development/doc1248781537747> (in Russian).
5. Rutko D. F. (2015) *Clusters in the European Union: Formation Mechanism and Development Trends*. Minsk. 29 (in Russian).
6. Battalova A. A. (2013) *Development Mechanism of Fuel Energy Complex Based on the Creation of Cluster*. Ufa. 22 (in Russian).
7. Porter M. (1993) *International Competition*. Moscow, Mezhdunarodnye Otnosheniya Publ. 896 (in Russian).
8. Volkov V. I., Malitskaya E. A. (2012) Cluster as a Tool for Increasing Competitiveness and Innovative Activity of the Regions. *Samoupravlenie* [Self Management], (10), 10–14 (in Russian).
9. Battalova A. A. (2012) Diagnostics of Regional Cluster in the Fuel and Energy Industry. *Problemy Ekonomiki i Upravleniya Neftegazovym Kompleksom = Problems of Economics and Management of Oil and Gas Complex*, (11), 44–48 (in Russian).
10. Kotlyarov N. N., Levchenko L. V. (2014) Foreign Experience in the Formation of Cluster Systems. *Mirovaya Ekonomika i Mezhdunarodnye Ekonomicheskie Otnosheniya. Ekonomicheskie Nauki* [World Economy and International Economic Relations. Economic Sciences], 119 (10), 105–110 (in Russian).
11. Khusainova E. K. (2015) *Assessment of Economic Efficiency of Energy-Saving Activities of Oil Refineries*. Saint-Petersburg. 115 (in Russian).
12. Surzhikov M. A. (2012) Clustering as a Means of Increasing the Potential of Foreign Economic Activity of the Region. *Uchiyot i Statistika = Accounting and Statistics*, 25 (1), 90–96 (in Russian).

Received: 09.09.2021

Accepted: 23.11.2021

Published online: 28.01.2022