

НАУКА и ТЕХНИКА



Science and Technique V. 19, No 3 (2020)

**Международный
научно-технический журнал**

**International
Scientific and Technical Journal**

**Серия 2. Строительство
Серия 6. Экономика промышленности**

**Series 2. Civil and Industrial Engineering
Series 6. Economy in Industry**

Издается с января 2002 года

Published from January 2002

Периодичность издания – один раз в два месяца

Publication frequency – bimonthly

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Founder

Belarusian National
Technical University

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

Строительство

- Khroustalev B. M., Veranko U. A., Zankavich V. V., Aliakseyeu Yu. G., Xuejun Yue, Shang Bo, Shi Jicun**
Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders
(Хрусталеv Б. М., Веренко В. А., Занкович В. В., Алексеев Ю. Г., Сюэцзюнь Юэ, Шан Бо, Ши Цзицунь)
Процессы структурообразования и свойства бетонов на органогидравлических вяжущих) 181
- Морозова Е. Б., Колесников А. А., Коршунова Н. Н., Долинина О. Е.**
Пространственная организация объектов энергетики: особенности и перспективы развития (на примере белорусской практики) 195
- Ковчур А. С., Шелег В. К., Жорник В. И., Ковалева С. А.**
Модифицирование керамического кирпича добавками неорганических техногенных продуктов водоподготовки ТЭЦ 204
- Ляхевич Г. Д., Гречухин В. А., Ляхевич А. Г., Рожанцев С. Ю.**
Теоретические аспекты, экспериментальные исследования и эффективность армирования бетона органическими волокнами 215

CONTENTS

Civil and Industrial Engineering

- Khroustalev B. M., Veranko U. A., Zankavich V. V., Aliakseyeu Yu. G., Xuejun Yue, Shang Bo, Shi Jicun**
Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders 181
- Morozova Y. B., Kolesnikow A. A., Korshunova N. N., Dolinina O. E.**
Spatial Organization of Energy Facilities: Specific Features and Development Prospects (on the Example of Belarusian Practice) 195
- Kauchur A. S., Sheleh V. K., Zhornik V. I., Kovaliova S. A.**
Modification of a Ceramic Brick Additives of Inorganic Technogenic Products of Water Treatment of Combined Heat and Power Plant 204
- Lyakhevich G. D., Grechukhin V. A., Lyakhevich A. G., Rozhantsev S. Yu.**
Theoretical Aspects, Experimental Investigations and Efficiency in Concrete Reinforcement by Organic Fibres 215

Босаков С. В. К решению контактной задачи для прямоугольной пластинки на упругом полупространстве	224
Пшембаев М. К., Ковалев Я. Н., Яглов В. Н., Гиринский В. В. Способы борьбы с зимней скользкостью	230
Осипов С. Н., Чик В. М. О стохастическом подходе к оценке долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций при карбонизации бетона	241
Круглов Г. Г., Линкевич Н. Н., Немеровец О. В. Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений	252

Экономика промышленности

Максимова Т. Г., Богданова Е. Л., Бровка Г. М. Исследование изменения роли ведущих университетов в национальной инновационной экосистеме при переходе к модели «Университет 4.0»	258
---	-----

**Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv**

Редакционная коллегия

- V. V. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
V. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
A. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
С. В. БОСАКОВ (Республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», Минск, Республика Беларусь),
Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
О. Г. ДЕВОЙНО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
К. В. ДОБРЕГО (Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь),
П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

Bosakov S. V. To Solution of Contact Problem for Rectangular Plate on Elastic Half-Space	224
Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Girinsky V. V. Methods for Prevention of Winter Slippery	230
Osipov S. N., Chik V. M. On Stochastic Approach to Evaluation of Service Life for Reinforced Concrete Constructional Elements and Structures during Concrete Carbonization	241
Kruglov G. G., Linkevich N. N., Nemerovets O. V. Filtration Bypassing Retaining Hydraulic Structures	252

Economy in Industry

Maximova T. G., Bogdanova E. L., Brovka G. M. Study of Changing Role of Leading Universities in the National Innovation Ecosystem during Transition to the University 4.0 Model	258
--	-----

**Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev**

Editorial Board

- V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*
V. G. BASHTOVOI (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. V. BYELI (Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
V. P. BOYKOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. V. BOSAKOV (Republican Unitary Scientific-Research Enterprise for Construction "Institute Belniis", Minsk, Republic of Belarus),
Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
K. V. DOBREGO (Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
P. I. DYACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

- М. З. ЗГУРОВСКИЙ* (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
- Р. Б. ИВУТЬ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- А. С. КАЛИНИЧЕНКО* (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
- М. Г. КИСЕЛЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Я. Н. КОВАЛЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- В. В. КОЗЛОВСКИЙ* (Минский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь),
- В. М. КОНСТАНТИНОВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Н. В. КУЛЕШОВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. Н. ЛЕОНОВИЧ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. А. МАСКЕВИЧ* (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
- Э. И. МИХНЕВИЧ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- НГУЕН ТХУ НГА* (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- М. ОПЕЛЯК* (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
- О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ* (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
- Г. А. ПОТАЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- M. Z. ZGUROVSKY* (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),
- R. B. IVUT* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- A. S. KALINICHENKO* (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
- M. G. KISELEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Ya. N. KOVALEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- V. V. KOZLOVSKIY* (Minsk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Minsk, Republic of Belarus),
- V. M. KONSTANTINOV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- N. V. KULESHOV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. N. LEONOVICH* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. A. MASKEVICH* (International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus),
- E. I. MIHNEVICH* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- NGUYEN THU NGA* (Institute of Energy Science of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Republic of Vietnam),
- M. OPELYAK* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
- O. G. PENYAZKOV* (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
- G. A. POTAEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

О. П. РЕУТ (Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики», Минск, Республика Беларусь),
Ф. А. РОМАНИУК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Л. СОЛОМАХО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
С. А. ЧИЖИК (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
А. Н. ЧИЧКО (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
В. К. ШЕЛЕГ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Й. ЭБЕРХАРДШТАЙНЕР (Венский технический университет, Вена, Австрия),
Б. А. ЯКИМОВИЧ (Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация)

O. P. REUT (Branch of the BNTU "Institute of Advanced Training and Retraining for New Areas of Engineering, Technology and Economy", Minsk, Republic of Belarus),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. L. SOLOMAKHO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. A. CHIZHIK (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
A. N. CHICHKO (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
V. K. SHELEG (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
J. EBERHARDSTEINER (Vienna University of Technology, Vienna, Austria),
B. A. YAKIMOVICH (M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation)

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

Адрес редакции

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

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

Address

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

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

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

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 29.05.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,5. 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, 2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194>

UDC 666.972; 974

Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders

**B. M. Khroustalev¹⁾, U. A. Veranko^{2, 3)}, V. V. Zankavich³⁾,
Yu. G. Aliakseyeu²⁾, Yue Xuejun⁴⁾, Bo Shang⁴⁾, Jicun Shi⁴⁾**

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

²⁾Science and Technology Park of Belarusian National Technical University “Polytechnic” (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Henan Center for Outstanding Overseas Scientists, Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co., Ltd (Xinxiang, People’s Republic of China),

⁴⁾National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Equipment, Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co., Ltd (Xinxiang, People’s Republic of China)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. The article addresses the issues of structure formation of road composite materials containing hydraulic (portland cement) and organic (bitumen) binders. It has been determined that organic and hydraulic binders, being thermodynamically incompatible, are capable of interaction and complement each other. Structure formation processes are associated with interphase transition layers interaction mechanism and the direct formation of phase contacts with cement crystallohydrates. The interphase boundary is diffuse and is established through interphase transition layers. The emergence of interfacial layers is thermodynamically advantageous, since it contributes to a decrease in Gibbs free energy and does not contradict modern concepts of solid state physics. It was established that with cement content of about 30 % of complex bitumen-cement binder volume, there will appear (nucleate) phase contacts that will prevail in the binder structure when the cement content is more than 60 %. In the case phase contacts prevail, concrete will demonstrate significant strength at high temperatures, but low temperature and fatigue crack resistance, which will lead to their durability loss. The cement content of 30–40 % of the total complex binder can be considered optimal.

Keywords: concrete based on organic-hydraulic binder, structure, bitumen, cement, interphase layer, phase contact, filler

For citation: Khroustalev B. M., Veranko U. A., Zankavich V. V., Aliakseyeu Yu. G., Xuejun Yue, Shang Bo, Shi Jicun (2020) Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders. *Science and Technique*. 19 (3), 181–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194>

Адрес для переписки

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

Процессы структурообразования и свойства бетонов на органогидравлических вяжущих

Академик НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Б. М. Хрусталеv¹⁾,
докт. техн. наук, проф. В. А. Веренько^{2,3)},
канд. техн. наук В. В. Занкович³⁾, канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев²⁾,
Юэ Сюэцзюнь⁴⁾, Бо Шан⁴⁾, Цзикунь Ши⁴⁾

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

²⁾Научно-технологический парк Белорусского национального технического университета «Политехник» (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Центр иностранных специалистов высокой квалификации, Хэнаньская технологическая компания «Гаоюань» по содержанию автомагистралей (Синьсян, Китайская Народная Республика),

⁴⁾Национальная инженерная лаборатория, Хэнаньская технологическая компания «Гаоюань» по содержанию автомагистралей (Синьсян, Китайская Народная Республика)

Реферат. Рассмотрены вопросы структурообразования дорожных композитных материалов, содержащих в своем составе гидравлические (портландцемент) и органические (битум) вяжущие. Установлено, что, являясь термодинамически несовместимыми, органические и гидравлические вяжущие способны к взаимодействию и дополняют друг друга. Процессы структурообразования связаны с механизмом взаимодействия межфазных переходных слоев и непосредственного образования фазовых контактов кристаллогидратами цемента. Исследования процессов срастания кристаллогидратов цемента через органические пленки, микроскопический и рентгеноструктурный анализ подтвердили данные результаты. Граница раздела фаз является размытой и осуществляется через межфазные переходные слои. Процесс появления межфазных слоев выгоден с термодинамической точки зрения, поскольку способствует уменьшению свободной энергии Гиббса и не противоречит современным представлениям физики твердого тела. При содержании цемента около 30 % от объема комплексного битумно-цементного вяжущего начнут появляться (зарождаться) фазовые контакты, которые будут преобладать в структуре вяжущего при содержании цемента более 60 % по объему. В случае преобладания фазовых контактов бетоны будут обладать значительной прочностью при высоких температурах, но низкой температурной и усталостной трещиностойкостью, что приведет к потере их долговечности. Оптимальным можно считать содержание цемента в количестве 30–40 % от общего объема комплексного вяжущего.

Ключевые слова: бетон на органогидравлическом вяжущем, структура, битум, цемент, межфазный слой, фазовый контакт, наполнитель

Для цитирования: Процессы структурообразования и свойства бетонов на органогидравлических вяжущих / Б. М. Хрусталеv [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 181–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194>

Introduction

Recently, new materials, including composites, have been used in road construction. Composites refer to materials consisting of two or more dissimilar materials and having properties that the original materials do not have. Road composites is a narrower class of composites. Their main difference is the use of two or more thermodynamically incompatible binders, which form bonds of different nature, strength and deformability in the structure of the material. Such binder compositions include, for instance, cement-asphalt, sulfur asphalt, asphalt with fatty acids, polymer modified asphalt, etc.

In road building practice, cement-asphalt compounds of various composition designs and technological processes for their preparation are widely used. In the future, we will call them concretes based on organic hydraulic binders (hereinafter referred to as OHB concretes).

OHB concrete is manufactured construction material that combines the properties of thermodynamically incompatible organic (bitumen, tar) and hydraulic (cement, gypsum, ash, etc.) binders in its structure. The invention of OHB concrete in road construction was associated with a number of reasons:

1) the lack of reliability and durability of conventional asphalt concrete in response to present-day traffic loads;

2) the introduction of new energy and resource-saving technologies that require the presence of water in the structure of the material (emulsions, foamed bitumen, wet organic-mineral mixtures, etc.);

3) the emergence of new technologies for repair and reconstruction of road surfaces (e. g. cold recycling).

New materials require the study of the peculiarities of their performance in a temperature-time field in order to develop objective technical requirements for their physical and mechanical properties, which ensure the required strength and reliability values. In addition to the authors, the issues of obtaining and optimizing the composition and structure of OHB concrete are dealt with by experts in most countries of the world [1–6]. The main technological parameters for concrete production have been established, studies of composition effect on strength have been carried out, and in-use life has been examined [7–11]. A significant role of cement in the processes of structure formation is recorded. In particular, it has been found that at low cement content, or its absence, the durability of the material in road surfaces is very low [12]. All this requires a more detailed analysis of the processes of OHB concrete structure formation.

The structure of OHB concrete includes two thermodynamically incompatible binders (cement and bitumen) and water. This provides the grounds for creating a complex structure, which cannot be attributed to crystallization (cement concrete), or coagulation (asphalt concrete). A fundamental issue is the purpose and effective use of cement in the process of OHB concrete structure formation. In some cases, its content is limited and considered a filler that absorbs excess water, in others it is an independent binder that increases the strength of the composite, especially at high operating temperatures. It is known that bitumen and cement are antagonists. Oil fractions of bitumen harm the structure formation of cement; water and hydration products interfere with the formation of bitumen bonds. This prevents a clear understanding of the processes of structure formation. The question of determining technical requirements to similar materials, designing road structure, and evaluating their reliability and durability is also unclear. To solve these problems, it is necessary to under-

stand the processes of structure formation of OHB concretes and obtain theoretically and experimentally proved models of their behavior in temperature-time fields under loads. New materials warrant further study of the peculiarities of their behavior in a temperature-time field in order to develop objective technical requirements, which can provide the required values of strength and reliability. At the first stage, studies were performed aimed at investigating the processes of structure formation and the structural peculiarities of complex binders, that have a significant effect on the properties of OHB concrete.

Body

During the preparation of concrete based on organohydraulic binders, aggregates of cement grains of various nature and structure are formed. Regardless of the preparation technology, there are conditions for water to penetrate into these aggregates and hydrate them. The possibility of hydration of the mineral binder makes it relevant to study the formation of direct crystallization (phase) contacts of cement aggregates of the optimal (effective) volume, including the case organic binder films are present in between, which is an important task for optimizing the properties of OHB concrete at the design stage of the composition to achieve maximum parameters of their operational reliability under the influence of weather and climate factors and traffic.

When studying the structure of OHB concretes, the question of the possibility of forming phase contacts between particles of hydrated cement in the presence of aqueous dispersions of bitumen or bitumen films is of paramount importance.

According to these ideas, during the hardening of binders, crystallization structures appear in the system. The basis of their development is the bridging of particles (crystalline or amorphous) of hydrated neoplasms in the process of separation of a new phase from supersaturated solutions. It is the bridging of particles – the formation of strong contact bridges between them – that is the main condition for the transformation of a dispersed system into an artificial stone exhibiting mechanical strength. Depending on the nature of particles interaction, it is advisable to distinguish between two main types of contact between particles (respectively, two types of dispersed structures),

which are commonly referred to as coagulation and phase. In coagulation contacts (or structures), the cohesion of the particles of the dispersed phase is limited by their simple “contact”, either directly or through the residual layer of the dispersion medium, mainly due to molecular (van der Waals) forces. Such contacts are of low strength (10^{-9} – 10^{-7} N) and mechanically reversible, which determines the viscoplastic and thixotropic properties of coagulation structures.

Unlike cements and concrete, the dispersed medium of cement-bitumen systems is not the aqueous phase, but the aqueous emulsion of bitumen, which contains, in addition to purely oil phase, many different active centers and surface-active substances (hereinafter referred to as surfactants). Therefore, the formation of strong structures in such systems, of course, will differ in certain properties. However, general fundamental laws apply in this case as well.

Let us consider several possible situations of contacting cement particles and its hydrates in water-bitumen emulsion and evaluate the possibility of bridging.

If the cement particles are in contact in one phase, the hydration process will be accompanied by the growth of hydrated neoplasms and the formation of strong phase contacts between them. The bridging can be slowed down due to the adsorption of surfactants, due to a decrease in the probability of bridging, but not suspended, as evidenced by experiments on the bridging of modified surfactants of gypsum crystals [13]. The possibility of bridging of particles in the presence of an oil phase is not excluded.

In bitumen emulsions and dispersions, the growth of crystals in the presence of films between them (and the creation of the crystallization pressure necessary for breaking through the films) can be carried out both by diffusion of ions over the surface of growing crystals (surface diffusion) and by diffusion through the volume of oil phase, followed by release in areas not occupied by surfactant molecules. The formation of phase contact between individual aggregates of hydrated cement can also occur as a result of rupture of bitumen films during compaction, as well as cement contraction during hydration. Contractual deformations of various cement constituents are in the range of 3–10 % [14], which in some cases

exceeds the ultimate deformation of bitumen film, especially of a reduced thickness, which makes 1–10 % [15].

In general, the probability of a crystal bridging in the presence of bitumen phase will be determined, first of all, by the size of the crystals formed and the thickness of the bitumen film. The larger the crystals and the thinner the bitumen film is, the higher the probability of crystal bridging is. The sizes of crystals of hydrosilicates (alite, tobermorite) are 0.25–0.50 microns, lime – 1–2 microns, ettringite – 16–20 microns [16]. If the thickness of the bitumen film scales to the double size of the crystals, then they can bridge.

It was decided to carry out experimental confirmation of the possibility of establishing phase contacts between hydrated cement aggregates when the dispersion medium is a bitumen emulsion or an aqueous dispersion of bitumen, by analyzing the direct processes of intergrowth of individual crystals in dispersion medium. This study is important, as it will allow us to focus on the effective concentration of a hydraulic binder in the design process of OHB concrete compositions which ensures the formation of a structure of complex binders with the required strength and deformation qualities. These effective concentrations, along with the peculiarities of the interaction of a complex binder and aggregates (granules from milling of road asphalt concrete pavements (hereinafter referred to as asphalt granules) or stone particles) will determine the reliability and durability of the composite.

First experimental studies of individual intergrowth contacts, which allowed to identify the patterns and mechanism of the formation of phase (crystallization) contacts between binder hydrate particles, was conducted under the supervision of Academician E. D. Schukin at the Department of Colloid Chemistry of Moscow State University and at the Laboratory of Physical and Chemical Mechanics of the Institute of Physical Chemistry Russian Academy of Sciences [13].

These studies were based on the measurements of adhesion forces between individual particles under conditions that actually occur during mineral binders hardening. They made it possible to establish the dependence of bridging process on such hardening factors as the metastability of the initial medium (supersaturation), the residence time of

particles in the coagulation contact, the presence of impurities in the medium – various ions, surfactants, etc. As a result, the role of mechanical efforts was established – the compression of particles to each other. Such compression can be provided both by applying external stresses, and due to the development of internal stresses in the forming hardening structure, as a result of crystallization pressure. In addition, in systems with two-phase dispersion medium (for example, bitumen emulsions), the compression of particles can be the result of capillary pulling forces of the menisci, which are formed in the contact between the particles due to selective wetting. Capillary forces contribute to the fixation of particles in a coagulation contact and considerably determine the behavior of the system at the initial stage of its formation.

In connection with the above, the precision technique developed at the Department of Colloid Chemistry of Moscow State University was used to measure adhesion forces in the contacts between individual particles [13]. It is based on the use of a galvanometer sensitive magnetoelectric system as a power meter. This technique allows you to adjust the force during the compression of particles and directly measure the adhesion forces in the contacts between them in a wide range of values: from very small components of $\sim 1 \cdot 10^{-8}$ N to relatively large – $\sim 10^{-3}$ N.

Gypsum was taken as the object of research, as it resembles the materials under consideration in its behavior the most, and at the same time, it is a fairly uniform and stable material. Calcium sulfate dihydrate crystals ($5 \times 5 \times 0.5$ mm in size) were used. The dispersed medium was a supersaturated solution of calcium sulfate obtained by dissolving semi-aqueous gypsum in water (three times more soluble than calcium sulfate dihydrate), followed by filtering the solution and diluting it to the

desired concentration C was obtained. This allowed to vary the degree of solution supersaturation $\alpha = C/C_0$ (C_0 – the solubility of calcium sulfate dihydrate) from 1 to 3. To model bitumen dispersions and emulsions, surfactants were used that did not lead to a significant change in the optical properties of the medium (octadecylamine, gelatin, dimethyldichlorosilane). A direct analogue of emulsions based on octane (oil phase) and cetylpyridinium bromide (emulsifier) was also used.

The idea of the experiments was as follows. Two particles placed in a supersaturated solution were brought into contact with a predetermined force f , kept in such fixed position for a certain period of time t , and then parted. The force needed to detach the particles was measured, which was identified with the strength of the individual contact p_1 .

Since crystal bridging is a probability process, the results were subjected to static analysis and the bridging probability was estimated:

$$W_{cp} = \frac{W_t}{W_0}, \quad (1)$$

where W_t – number of “strong” contacts; W_0 – total number of contacts registered.

“Strong” (phase) contacts are contacts with a force of more than 10^{-6} N. Weak (coagulation) contacts are those with a limiting separation force of less than 10^{-7} N.

Studies of the bridging of individual particles, the surface of which was modified by a surfactant, showed (Tab. 1) that in all cases a decrease in the bridging probability is observed. In this case, the reduction bridging effect W_b depends on the symbols of the approaching faces, which is associated with their different adsorption capacity and their growth rate.

Table 1

The effect of surface modification of crystals on the probability of their bridging W_b in supersaturated calcium sulfate solutions

Crystal in contact	Surface modifier	W_b , %	α	t , s
Gypsum-gypsum	ODA	36 (67)	1.8	1000
Gypsum-quartz	ODA	27 (68)	1.8	1000
Gypsum-quartz	DMS (quartz)	32 (69)	1.8	3000
Gypsum-gypsum	Gelatin	42 (49)	1.8	100
Gypsum-quartz	Gelatin	38 (68)	1.8	1000

Note. The values specified in parentheses are for unmodified crystals. ODA – octadecylamine; DMS – dimethyldichlorosilane, was used for preliminary hydrophobization of quartz surface.

With rapid crystallization (and rapid growth of faces), molecules or ions of a crystallizing substance will interfere with the adsorption of surfactants and may displace part of them from the surface. At the same time, the difficulty of bridging of neoplasm particles at the initial stage of hardening will favorably affect the strength of the finally formed structure, since it inhibits the formation of a primary rigid frame capable of accumulating elastic stresses. Internal stresses developing during the formation of the structure can lead to its irreversible destruction, especially in the late stages of hardening (when new contacts scarcely occur), and to a decrease in the final strength. Therefore, this behavior of surfactants at their optimal proportioning provides the conditions for creating a stronger final structure with fewer residual internal stresses.

Thus, the presence of a surfactant in dispersion medium does not prevent the appearance of phase contacts, but the probability of such contacts is reduced by two or more times. Therefore, when using bitumen emulsions, the bridging of crystals through emulsion dispersion medium will occur and a crystallized framework of reduced strength will be created.

To directly confirm the bridging of crystals in direct emulsions, an attempt was made to measure the adhesion forces of gypsum crystals in emulsions containing 50 % (by volume) of oily dispersed phase (octane) in supersaturated solution of calcium sulfate. Cetylpyridinium bromide was used as an emulsifier. However, experiments with such emulsions are difficult due to their large turbidity, which does not allow to register the moment of particles joining and the moment of contact rupture. In addition, the appearance of sufficiently large adhesion forces between gypsum crystals ($>10^{-7}$ N) in emulsions cannot be considered as direct evidence of their bridging, since such adhesion forces can also be associated with the manifestation of capillary forces due to the appearance of a meniscus in the contact zone. To give a clear answer, it is necessary to separate the contribution of capillary forces p' and the contribution of cohesion forces p'' at bridging in the total contact strength p_1 establishing between gypsum crystals with the presence and isolation of a new phase in the contact zone.

This can be done by simulating various situations that may occur when particles are in contact in emulsions. It is such model experiments that will ascertain the fact of particle bridging in two-phase liquid medium more objectively.

For this purpose, contact strength was measured for the contact between gypsum crystals placed in octane medium when a drop of calcium sulfate solution – saturated and supersaturated towards gypsum crystals – was introduced into the contact zone.

Preliminary experiments were conducted to select the optimal volume of droplets introduced into the contact zone, which was necessary to obtain reproducible results. The optimal volume proved to be 0.5–0.6 mm³.

The crystals brought together were compressed with force f , kept in this state for a predetermined amount of time t (100 or 1000 s). Then a negative force was applied to them (tensile force f_p). The f_p value at which the crystals detach from each other, i. e., the individual contact strength p_1 was measured. Each measurement was reproduced at least 30–50 times (depending on the distribution of values p_1) in order to ensure sufficient results for an objective analysis of statistics.

Studies have shown that at low force f , time t and low supersaturation, the contact forces do not exceed 10^{-4} N, i. e., the contact strength resulting from the action of menisci. Crystal bridging occurs in this case as well though, but the strength due to cohesion forces p'' shows at or below the strength associated with the manifestation of capillary forces, i. e. $p_1'' < p_1'$. The fact of bridging is evidenced by the nature of the separation of particles from each other, observed visually (by a microscope).

In the absence of bridging, the supply of tensile force f_p (separating the particles) from the very beginning leads to the emergence of a gap between the particles and the gradual “stretching” of the meniscus, which increases as the force builds up. Separation of particles occurs at the time of rupture of the meniscus column under the action of critical force f_{pc} . This force determines the contact strength due to the action of capillary forces p' .

The occurrence of bridging contacts manifests itself in the fact that, when applying tensile

force f_p , the gap between the crystals appears only when a certain critical force is achieved, corresponding to the contact strength due to cohesion forces $f_{p_c} = p''$. When this force is exceeded ($f_{p_c} > p''$), the gap increases and the meniscus stretches, rupturing upon reaching $f_{p_c} > p'$. In this case, the strength of the contacts due to bridging p'' is lower than the meniscus rupture force p' .

It is possible to observe the occurrence of bridging contacts with strength exceeding the meniscus rupture force. A bar graph in Fig. 1 presents the strength of the contacts arising between gypsum crystals located in the octane medium in the presence of a drop of a calcium sulfate supersaturated solution in the contact zone ($\alpha \cong 3$). The contact time was 100 and 1000 s, the compressive force was 10^{-6} and 10^{-5} N. The figure shows that most of the bridging contacts have the strength p'' of the same order as the strength due to the capillary forces of the meniscus p' . At the same time, these contacts are of fundamentally different nature: their occurrence is the result of crystal bridging in the process of separation of a new phase from a supersaturated solution in the contact gap. Therefore, unlike contacts due to the action of menisci, they are destroyed irreversibly. After damaging such contacts (when moving the particles apart) to restore them, it is not enough to bring the crystals into contact again. In this case, only the meniscus is restored in the contact zone, and the bridging forces and the nature of subsequent separation of the particles corresponds to the action of only capillary forces. To restore the bridging contact, it is necessary to provide supersaturation

in the contact meniscus and sufficient time of crystals being in contact in order for the contact nucleus to appear and grow. Only after this the nature of the separation of the crystals becomes different. If, under these conditions, the growth process has managed to cover a sufficiently large part of the contact gap, then the measurements reveal contacts with higher strength associated with the binding action of the meniscus.

Thus, the appearance and development of phase (crystallization) bonds in the structure of OHB concrete is possible and likely. This should lead to an increase in strength at high temperatures and a decrease in the temperature-time sensitivity. However, this probability will be manifested at appropriate concentrations of cement in the total volume of binder, also depending on the properties and quality of the aggregate.

The appearance of phase contacts in the structure of the material will lead to a number of peculiarities in the behavior of the material, its properties and reliability in road structure. The result of phase contacts will be the strength increase, especially at high temperatures, as well as stiffness (elastic modulus). However, there will be a downward trend in temperature crack resistance and fatigue life. In this case, it is important to find the optimal amount of these contacts that do not reduce the level of reliability in general.

At the same time, and at lower cement concentrations, various physical and chemical processes are possible at the interface between organic and hydraulic binders, due to adsorption-solvation phenomena and the interaction of active groups of organic binder with hydration products.

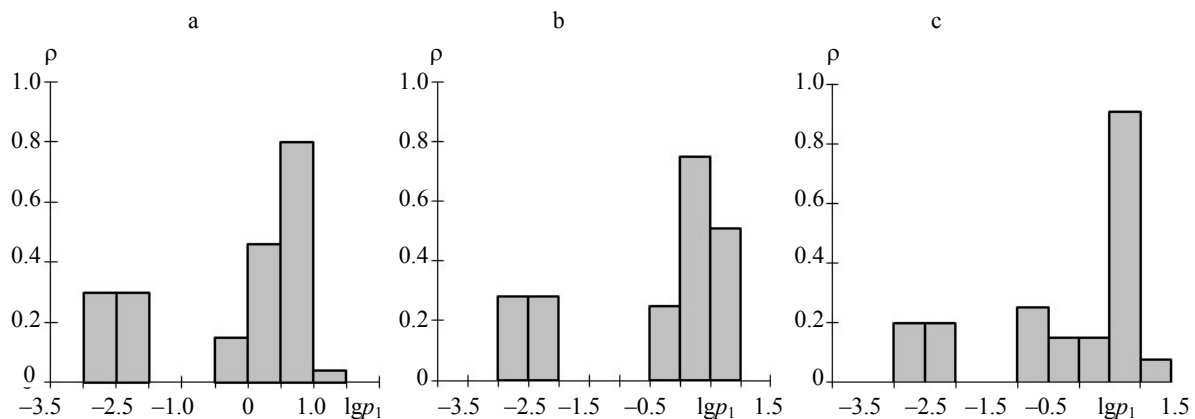


Fig. 1. Histograms showing contact strength in calcium sulfate dihydrate crystals in the presence of meniscus in supersaturated aqueous solution in the contact zone: a – $f = 10^{-6}$ N, $t = 100$ s; b – 10^{-6} N, 1000 s; c – $f = 10^{-5}$ N, $t = 100$ s

In our opinion, the process of structure formation of OHB concretes can be mainly caused by the appearance of interfacial layers of various lengths [17, 18]. For OHB concretes these layers can be formed by molecular and intermolecular clusters of various sizes and structures.

The length of the interfacial layer is different and depends on the properties of the substrate and the type of adsorbent [17, 18]. With regard to polymers, this layer can reach 50–60 μm [19], for bitumen 0.8 μm [20]. This difference is related to the structure of polymer molecules and their ability to conformation. When cement hydration products are used as a substrate, the thickness of the oriented polymer layer increases by an average of 1.5–1.9 times [21].

Therefore, the transition layer of bitumen during cement hydration can reach 1.2–1.5 microns.

The formation of interfacial layers will be affected by both physical (adsorption, crystal intergrowth and destruction of bitumen associates, ion transfer, etc.) and chemical (formation of $\text{Me} + \text{OOCR}$ bonds, hydrogen bonds–H–O, etc.) processes. The bonds of $\text{Me} + \text{OOCR}$ type will be formed by metal ions, their oxides and hydroxides that occur during hydration of the mineral binder, due to interaction with oxygen, hydroxyl and carboxyl groups of the organic binder. Hydroxyl groups of hydration products and, accordingly, hydroxyl, nitrogenous and sulfur compounds of bitumen (tar) will participate in the formation of hydrogen bonds. The volume of these compounds can be very small and cannot be detected by existing methods of analysis, however, their role as interfacial layers can be very significant.

The presence of a transition layer in OHB concretes allows us to prove that despite the absence of chemical interaction between hydration products and the organic binder or the formation of a crystallization bond through organic films, the “organic – mineral binder” system is not a physical mixture of two substances.

To study the conditions for the appearance of interphase layers and their structure, it is necessary to develop special theoretical and experimental approaches based on modern ideas about the structure of solids at the level of valence bands, in particular, involving the theory of atomic and configuration models of solids [22].

Theoretically, the structure of any of the compositions of the “cement–bitumen–water” system can be represented as a set of the following elements: cement, bitumen, water, cement–bitumen interface, bitumen–water interface, cement–water interface, cement–bitumen–water interface. The quantitative ratio between bitumen–water interface, cement–water interface, cement–bitumen interface, and cement–bitumen–water interface is determined by the ratios X/Y , Y/Z , X/Z in the system $X_{\text{cement}} + Y_{\text{bitumen}} + Z_{\text{water}}$. The interface can be quite large, depending on the affinity of the composition to the solubility limit of the system. With this representation of the “cement–bitumen–water” system, the question of the physical model of the system’s interface remains the most important. The physical model of the boundary can be represented on the basis of the electronic model [23], which was developed in the study of various materials characterized by the eutectic type of reaction [24].

Specifying the above mentioned with respect to the “cement–bitumen–water” system, it can be said that nanoareas are areas formed due to charge transfers of $\text{SiO}_2\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--CnHm--H}_2\text{O}$ complexes. In other words, these are nanoscale areas arising at $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2\text{--CnHm}$, $\text{CaO--H}_2\text{O}$, CaO--CnHm interfaces, etc. Thus, based on modern concepts of interfaces in mechanical mixtures, it is possible to substantiate the formation of cluster areas with an electronic structure different from the components that make up the system.

Since hydraulic and organic binders are thermodynamically incompatible and cannot form a stable single-phase system, the phase boundary is blurred and contacts are made through interfacial transition layers. The formation of interfacial layers is influenced by both physical (crystal intergrowth, adsorption, destruction of bitumen associates, ion transfer, formation of double electron layers) and chemical (formation of $\text{Me} + \text{OOCR}$, hydrogen–H–O bonds, etc.) processes.

Let us formulate the thermodynamic approach to the conditions for the formation of interfacial transition layers.

Interfacial Gibbs energy, for example, “hydrated cement–bitumen” ($F_{\text{HC-B}}$), taking into account the formation of transition layers of a cluster type at the interface, can be determined from the following condition:

$$F_{HC-B} = (1 - x_1 - a_1x_1)F_C + (x_1 - b_1x_1)F_B + (a_1x_1 - b_1x_1)F_{C-BI} + 2RT[a_1x_1\ln(a_1x_1) + b_1x_1\ln(b_1x_1)], \quad (2)$$

where F_C , F_B – Gibbs energy of hydrated cement and bitumen respectively; x_1 – bitumen mole fraction in relation to cement; a_1 , b_1 – ratios of cement and bitumen characterizing the proportion of molecules in the transition layer, the values of which are less than one; F_{C-BI} – Gibbs energy of the transition layer interface molecules of cement-bitumen particles; T – temperature; R – absolute gas constant.

Since Gibbs energy is always negative, then F_{C-BI} is less than zero and, therefore, the more $a_1x_1 + b_1x_1$ is, the lower Gibbs energy of the whole F_{HC-B} system is.

The contribution of $a_1x_1\ln(a_1x_1) + b_1x_1\ln(b_1x_1)$ to model (2) allows one to take into account the molecules mixing entropy in the transition layer of cement-bitumen particles and characterizes the number of “permutations” formed by unlike particles of transition layers of cement and bitumen, since $a_1x_1 < 1$ and $b_1x_1 < 1$, the contribution of these layers in model (2) gives a negative value (the logarithm of the number is less than one), which also leads to a decrease in Gibbs energy in “cement-bitumen-water” system. Thus, the appearance of transition layers reduces total Gibbs energy and, therefore, is a thermodynamically favorable process.

The experimental evidence of the presence of cluster type transition layers was carried out by photoelectron spectroscopy methods that prove to be most effective in the studies of materials chemical bonding. Using the photoelectron spectra of various “cement-bitumen-water” systems, the nature of bonds at the level of valence bands was determined with subsequent mathematical processing and analysis.

As a result of comparing the experimental data and the spectra obtained by computer simulation methods (Fig. 2), it was found that the introduction of water into the cement-bitumen system leads to the formation of transition areas with a certain chemical bond energy. The presence of such a bond indicates a considerably strong and stable structure of complex binders of OHB concrete to both mechanical loads as well as weather and climate factors.

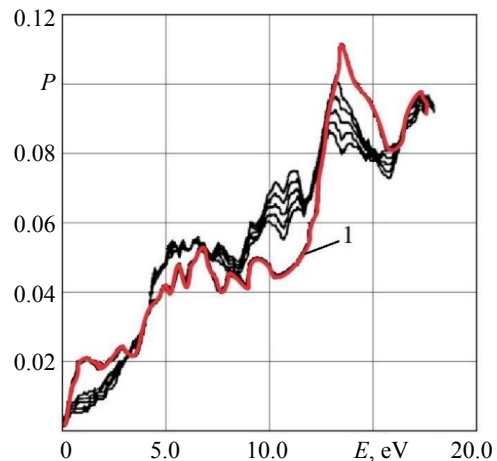


Fig. 2. Standardized valence bands x (cement) + y (bitumen) ($0.5 < x < 0.9$; $0.1 < y < 0.5$) and cement + bitumen + water (experiment) (curve 1)

On the basis of theoretical and experimental studies, a structural model of OHB concrete complex binder has been developed, which is represented by cement aggregates that have been hydrated to varying degrees and a number of interfacial transition layers (Fig. 3).

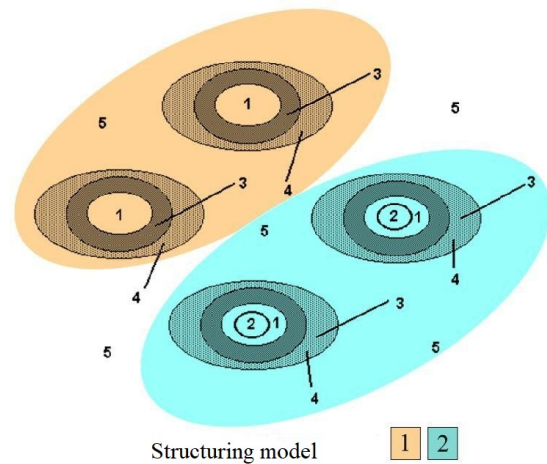


Fig. 3. Structural model of OHB concrete complex binder: 1 – area of hydrated cement, for which the interaction energy of cement and bitumen particles is zero; 2 – non-hydrated cement area; 3 – interfacial transition layer on the cement side; 4 – interfacial transition layer on the bitumen side; 5 – area of bitumen, for which the interaction energy of cement and bitumen particles is zero (unstructured bitumen)

The appearance of interfacial layers will also contribute to an increase in the strength of the composite prepared on a complex bitumen-cement binder, but at the same time, its temperature crack resistance will be maintained with an increase in fatigue life.

Depending on cement phase volume fraction, cement structural aggregates can interact with each other through layers of bitumen, transition layers, or directly with each other, forming phase contacts.

In accordance with the proposed structure formation scheme, the effect of a hydraulic binder on the structure and properties of concrete will be manifested by the filler mechanism.

At the same time, it is a special filler. First of all, it is a reinforcing filler forming secondary structures in a bitumen matrix. The secondary structures of the mineral binder can interact with each other through phase contact, or transition layers with higher strength than the bitumen matrix. As a result, a spatial reinforcing mesh is formed with a "hinged" connection at nodes of various degrees of mobility. A mineral binder will also have a bridging effect, since mineral binder aggregates, in contrast to inert fillers, will become a fairly monolithic system after hydration.

Hydraulic binder is a more active filler in terms of physical and chemical interaction with organic binders, compared, for example, with mineral dolomite powders. This is due to the appearance of more extended interfacial cluster type layers associated with the interaction of hydrated neoplasms and an organic binder. This is due to the higher activating effect of cement in comparison with lime and other inactive binders.

Thus, the mineral binder in the structure of OHB concrete is manifested by the mechanism of the active, bridging and reinforcing filler, which determines the interaction of the complex bitumen-cement binder with the macrostructure and mesostructure of the composites, composed of stone aggregate, or granular asphalt. Therefore, the effect of introducing a mineral binder will depend primarily on its volume concentration in the complex binder and its threshold concentrations can be determined using percolation theory [25].

In percolation theory, two main tasks are distinguished: the bonding problem and the node problem. The issue of the formation of percolation "bridges" in secondary structure aggregates of composite binders is a typical task of nodes. The solution to this problem for two environments is known. According to [25], the formation of a percolation framework occurs when the volume content of clusters is more than 0.17. However, percolation bonds at this content are still rare and

the hardening of the structure is insignificant. Noticeable effect of clusters occurs when their volume content reaches 0.33 [26]. Consequently, the effect of the secondary structure on the properties of concrete will manifest itself with a volumetric content of at least 0.33 of the main binder. Further increase in the content of the secondary structure leads to more frequent contacts of clusters; with a volume content of about 0.67 [26], a continuous lattice of the secondary structure is formed. The material acquires basic properties of a secondary binder and a further increase in its volumetric content is not significant. However, the percolation theory makes it possible to establish only boundary concentrations without constructing a complete curve illustrating the dependence of the number of contacts between particles on their volume. Given the presence of a number of transition layers (Fig. 3), it is advisable to use mathematical modeling methods to construct a visual model of structure formation [27]. To simulate the process of structure formation, a special program has been developed.

The program is based on the solution of the problem of maximum filling a square of side A with circles of radius R . The following conditions have been accepted. Let A be a fixed number, let X , Y and R be independent random variables, where X and Y are evenly distributed on intervals $[0; A]$, and R has a normal distribution with parameters $R_0 > 0$ (mathematical expectation) and $\sigma > 0$ (standard deviation; if $\sigma = 0$, then the random variable $R = R_0$ is a constant).

It is required by mathematical modeling method to determine the maximum fillability of the square of side A with disjoint circles of radius R with centers at points with coordinates $(X; X)$. Fillability stands for the ratio of the total area of circles to the square area. Fillability is considered to be maximum if, as a result of N -fold (N – set value) modeling, it is not possible to place a circle in a square so that it does not intersect with the circles already placed and the borders of the square. Each circle of radius R is covered with a film (transition zone) $d = y(R)$ thick, where $y(R)$ is a function depending on R by one of the mathematical functions (hyperbole, exponent, etc.), that is, the sizes of the transition zones are also defined according to random distribution.

Two design patterns similar to the proposed model of a binder composite material (Fig. 3) have

been considered. The first pattern involves changing the size of the transition layer by increasing the external dimensions of the structural aggregate while maintaining the size of the hydrated core (Fig. 3, model 1). The second pattern keeps the external diameter constant, developing a transition layer inwards the aggregate (Fig. 3, model 2). In this case, the contacts of the balls through the inner circles (dry contact) were not allowed. In accordance with this pattern, the higher the degree of hydration is, the larger the size of the transition layer is.

As a result of the calculations, the dependencies of the number of contacts (interactions) of structural complexes on the volume content of the mineral binder and the size of the transition layers have been obtained. One of these dependencies is shown in Fig. 4.

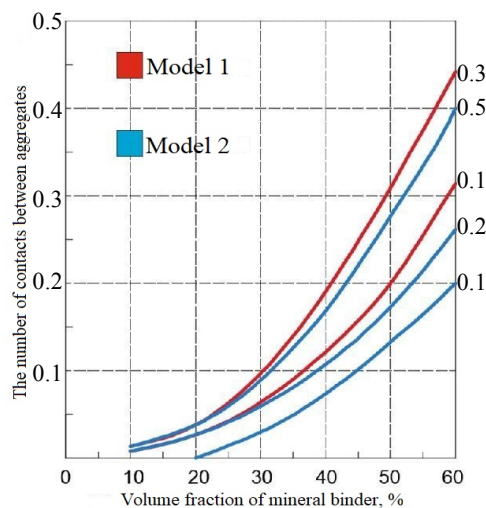


Fig. 4. Dependence of the number of contacts between structural aggregates of OHB concrete binder: the values on the curves denote the specific length of the transition layer (of the aggregate size)

As a result of data analysis, Fig. 4, the following conclusions can be made:

- 1) the number of percolation contacts increases in power-law dependence with an increase in the cement phase volumetric content;
- 2) due to the presence of transition layers, the percolation thresholds of structure formation are shifted downward. This reduction can reach 50 %;
- 3) with an increase in the hydration of unreacted grains, the number of contacts and the strength of the system increase. Other things being equal, preliminary hydration of cement allows to increase

the number of structural aggregates by 1.3–1.5 times.

In general, the volumetric content of mineral binder necessary for the formation of percolation transitions depends on the structure formation model and the specific length of the transition layers (Tab. 2).

Table 2

Volume fractions of mineral binder necessary for the formation of percolation transitions

Volume fraction of percolation transitions, %	Average specific length of a transition layer		
	0.1	0.3	0.5
17	<u>0.15</u> 0.07	<u>0.14</u> 0.15	<u>0.12</u> 0.13
34	<u>0.26</u> 0.31	<u>0.20</u> 0.27	<u>0.16</u> 0.22
67	<u>0.30</u> 0.44	<u>0.20</u> 0.37	<u>0.09</u> 0.21

Note. The numerator shows the data for structure formation model 1, the denominator – model 2 (Fig. 3).

Analysis of bitumen-cement system structure was performed using an electronic scanning microscope. The surface of the samples examined had been prior subjected to shearing and grinding.

The presence of transition zones between organic and mineral binders has been established. The photographs clearly show aggregates and clusters of hydrated particles, “connecting” larger hydrated neoplasms through bitumen films. The structure of the transitional layer itself is granular with a gradual size reduction (Fig. 5). The extent of the zone can be quite large and able to connect aggregates separated by an organic binder film. Large intergrown crystals and clusters of smaller neoplasms are clearly visible, gradually turning into molecular regions (Fig. 5a). At the presence of cement phase, there appear phase contacts (Fig. 5b).

Thus, direct experiments have shown the possibility of phase coalescence of particles and the formation of a crystallization bond in the presence of a two-phase (for example, emulsion) medium. At the same time, the bridging probability and the strength of the contacts are significantly reduced.

Calculations show that the appearance of phase contact is real at bitumen film thickness of less than 1–2 microns.

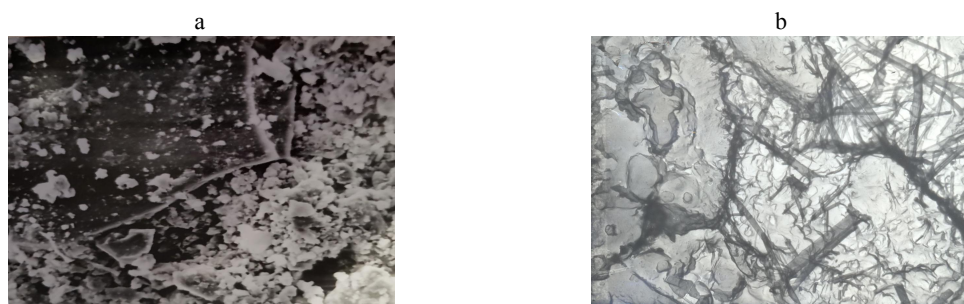


Fig. 5. Image of OHB concrete microstructure: a – granular structure; b – cement phase

The presence of transitional interfacial layers and phase contacts in the structure of OHB concrete is confirmed by a number of experimental studies. Experimentally, this is confirmed, for example, by the decrease in the strength of OHB concrete obtained by mixing mineral material, bitumen emulsion and cement, while destroying the original samples and their recycling. In the presence of phase contacts and transition zones, the strength of the recycled samples decreases, since these contacts are destroyed irreversibly. With this in mind, it is possible to identify onset zones of cement influence on the structure of concrete (8–10 %) and the zones of the appearance of a continuous network of phase contacts (50–60 %), which fully confirms the above provisions. The optimum cement content, taking into account the probabilistic nature of this value, can be considered 30–40 %, which will largely allow both strength and deformability of the composites.

At the same time, the study was aimed at studying the processes of structure formation in a complex bitumen-cement binder, the main results of which can be extended to the properties of OHB concretes when sealable stone aggregates act as a filler. The situation is a little different when granular asphalt is used as a filler, where the main part of the surface of the polygranular particles are covered with old bitumen. For such composites, a more detailed study of the processes of bitumen involvement in deformation process is needed, when most solid phase contacts develop through aggregate particles not coated with bitumen with the formation of a continuous condensation-crystallization structure. In this case, whiskers partially penetrate into bitumen films and during the interaction of hydration products with bitumen active components on the surface of granular asphalt particles, and the spatial condensation-

crystallization structure formed this way, determines the elastic properties of the composite. All this considerably determines the properties of cold regenerated mixtures based on asphalt granules, up to 100 % of their content.

Based on the complexity of the processes that occur during the formation of the structure of composites based on asphalt granules and organic-hydraulic binders, an important question arises of providing and predicting their physical and mechanical properties, which should be solved at mixture composition design stage depending on the quality of the original components. The questions are being resolved by our research team at the moment.

CONCLUSIONS

1. Regardless of the method of water supply and the technology of OHB concrete preparation, aggregates and cement floccules are formed in the binder structure, surrounded by direct and reverse emulsion (dispersion) of the organic binder. This creates the condition for the interaction of cement with water and its hydration. Due to partial mutual solubility of the components, the accumulation and retention of water at the active centers of the organic binder, diffusion, rupture of bitumen films due to intracrystalline pressure, conditions arise for the bridging of individual aggregates by a chemical bond. However, the strength of this bond is significantly lower than the strength of cement.

2. The effect of cement injection cannot be explained only by the surface interaction of active groups with hydration products. The OHB concrete structure formation process is caused by a complex of physical (intracrystallization pressure, crystal intergrowth into bitumen films, their rupture, etc.), physical and chemical (destruction of bitumen associates and chemisorption interaction of bitu-

men components and hydration products) and chemical (interaction of organic binder active groups with active groups, oxides and hydroxides of hydration products) processes. Taken together this all leads to the appearance of cluster type interfacial transition layers, which play the main role in structure formation of OHB concrete.

3. Despite the fact that organic and hydraulic binders are thermodynamically incompatible products and cannot form a stable single-phase system, the phase boundary is blurred and shows as interfacial transition layers. These layers have a certain chemical bond energy, the value of which will determine the strength and stability of the final structure. The emergence of interfacial layers is thermodynamically advantageous, since it contributes to a decrease in Gibbs free energy and does not contradict modern concepts of solid state physics. It is the effect of the appearance of such layers that can explain the higher “activating” ability of cement in mixtures on cationic emulsions and neutral bitumen.

4. Using the obtained model ideas about the number of contacts of structure-forming complexes with different transition layer thicknesses, one can imagine the influence of the structure and properties of individual complexes on the properties of the system as a whole at the phenomenological level. As a result of theoretical and experimental studies, the following practical conclusions can be drawn:

- the effect of cement on the properties of a complex bitumen-cement binder and concrete prepared on its basis will manifest itself at the content of about 8–10 % of the total volume of the binder;

- when cement content is about 30 %, phase contacts will appear, which will prevail when the cement content is more than 60 % of the total binder. If such contacts prevail, concrete will demonstrate high strength at high temperatures, but low temperature and fatigue crack resistance, which will lead to a significant reduction in the durability. The optimum cement content, taking into account the probabilistic nature of this value, can be considered 30–40 %, which will largely allow both strength and deformability of the composites;

- for concrete obtained by mixing granular asphalt, bitumen emulsion and cement, the optimum cement content at the design stage should be estab-

lished not only based on the structural formation of a complex bitumen-cement binder, but also taking into account the involvement of old bitumen covering the particles of this polygranular aggregate in the deformation process.

5. It is necessary to develop a methodology for selecting OHB concrete composition based on the optimization of their elastic and viscous properties, taking into account the properties of granular asphalt and the amount of cement, which will effectively control the durability and reliability of such composites.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Henan Center for Outstanding Overseas Scientists under Grant number GZS2018006; National Key R&D Program of China (YS2018YFE010143); Henan Province Science and Technology Major Project from the Department of Science and Technology of Henan Province under Grant number 151100310700; National Science-technology Support Plan Project from the Ministry of Science and Technology of the People Republic of China under Grant number 2015BAF07B08; Intergovernmental International Cooperation on Science and Technology Key Innovation Project from the Ministry of Science and Technology of the People Republic of China under Grant number 2016YFE0111000. The matter of the article reflects views of the authors who are responsible for the facts and accuracy of the data presented therein.

REFERENCES

1. Vaitkus A., Gražulytė J., Juknevičiūtė-Zilinskienė L., Andrejevas V. (2017) Review of Lithuanian Experience in Asphalt Pavements Cold Recycling. *In Proc. of the 10th International Conference “Environmental Engineering”: Selected Papers. 27–28 April 2017, Vilnius, Lithuania.* Vilnius Gediminas Technical University. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.153>.
2. Veranko V. A., Makarevich A. A. (2008) Experience of Using In-Situ Cold Recycling Technology when Repair of Streets of the Minsk City. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty [Roads and Bridges]*, (1), 13–18 (in Russian).
3. Chomicz-Kowalska A., Stepień J. (2016) Cost and Eco-Effective Cold In-Place Recycled Mixtures with Foamed Bitumen During the Reconstruction of a Road Section Under Variable Load Bearing Capacity of the Subgrade. *Procedia Engineering*. 161, 980–989. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.837>.
4. Bocci M., Manganaro A., Stramazzo V., Grilli A. (2013) Runway Pavement Reconstruction with Full Material Recycling: the Case of the Airport of Treviso. *Advanced Materials Research*. 723, 1044–1051. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.1044>.

5. Chesner W., Stein C., Jastus H., Kearney E., Cross S. (2011) Related Information Evaluation of Factors Affecting Long-Term Performance of Cold In-Place Recycled Pavements in New York State. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2227, 13–22. <https://doi.org/10.3141/2227-02>.
6. Turk J., Mauko Pranić A., Mladenović A., Cotić Z., Jurjavčič P. (2016) Environmental Comparison of Two Alternative Road Pavement Rehabilitation Techniques: Cold-in-Place-Recycling Versus Traditional Reconstruction. *Journal of Cleaner Production*. 121, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.040>.
7. Tabaković A., McNally C., Fallon E. (2015) Specification Development for Cold In-Situ Recycling of Asphalt. *Construction and Building Materials*. 102, 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.154>.
8. Kim Y., Lee H. D. (2006) Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 18 (1), 116–124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561).
9. Meocci M., Grilli A., La Torre F., Bocci M. (2017) Evaluation of Mechanical Performance of Cement-Bitumen-Treated Materials Through Laboratory and In-Situ Testing. *Road Materials and Pavement Design*. 18, 376–389. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213506>.
10. Du S. (2015) Performance Characteristic of Cold Recycled Mixture with Asphalt Emulsion and Chemical Additives. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015 (Article ID 271596), 8. <https://doi.org/10.1155/2015/271596>.
11. Ma T., Wang H., Zhao Y., Huang X., Pi Y. (2015) Strength Mechanism and Influence Factors for Cold Recycled Asphalt Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015 (Article ID 181853), 10. <https://doi.org/10.1155/2015/181853>.
12. Mollenhauer K., Simanofske D., Valentin J., Čížková Z., Suda J., Batista F., McNally C. (2016) Mix Designs for Cold Recycled Pavement Materials Considering Local Weather and Traffic Conditions. In *Proc. of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress: Selected Papers*, 1–3 June 2016. Prague, Czech Republic. Czech Technical University in Prague. <https://doi.org/10.14311/ee.2016.357>.
13. Shchukin E., Pertsov A., Amelina E. (2012) *Colloid Chemistry*. Moscow, Yurayt Publ. 444 (in Russian).
14. Volzhensky A., Burov Yu., Kolokolnikov V. (2016) *Mineral Binders. Technology and Properties*. Moscow, KnoRus Publ. 463 (in Russian).
15. Rudensky A., Rudenskaya I. (1971) *Rheological Properties of Bitumen-Mineral Materials*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 131 (in Russian).
16. Larionova Z., Nikitina L., Goroshin V. (1977) *Phase Composition, Microstructure and Strength of Cement Stone and Concrete*. Moscow, Stroizdat Publ. 262 (in Russian).
17. Rusanov A. (1967) *Phase Equilibria and Surface Phenomena*. Leningrad, Khimiya Publ. 388 (in Russian).
18. Lipatov Yu. (1991) *Physico-Chemical Bases of Filling of Polymers*. Moscow, Khimiya Publ. 259 (in Russian).
19. Tikhonov N. (2005) *Adaptation of the EPR Method to the Study of Surface Interactions of Filled Polymers and Fractal Aggregates*. Moscow. 113 (in Russian).
20. Korolev I. (1975) *Road Warm Asphalt*. Kiev, Vysshaya Shkola Publ. 155 (in Russian).
21. Block A., Simms B. B. (1967) Desorption and Exchange of Adsorbed Octadecylamine and Stearic Acid on Steel and Glass. *Journal of Colloid and Interface Science*, 25, 514–518. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(67\)90062-8](https://doi.org/10.1016/0021-9797(67)90062-8).
22. Samsonov G., Pryadko I., Pryadko L. (1976) *Electronic Localization in a Solid*. Moscow, Nauka Publ. 338 (in Russian).
23. Goldade V. (2009) *Condensed Matter Physics*. Minsk, Belorusskaya Nauka Publ. 648 (in Russian).
24. Chichko A. (1995) *Physical Model of Eutectic Alloys Based on Electronic Configurations of Atoms of Interacting Components*. Minsk. 36 (in Russian).
25. Shklovskii B., Efros A. (1975) Percolation Theory and Conductivity of Strongly Inhomogeneous Media. *Soviet Physics Uspekhi*. 18 (11), 845–862. <https://doi.org/10.1070/pu1975v018n11abeh005233>.
26. Zhigur Yu. (2007) *Considering the Probabilistic and Statistical Variability of Physical and Mechanical Properties of Materials of Structural Layers in the Calculation of Non-Rigid Pavement*. Moscow. 149 (in Russian).
27. Wentzel E., Ovcharov L. (1991) *Theory of Random Processes and its Engineering Applications*. Moscow, Nauka Publ. 383 (in Russian).

Received: 10.02.2020

Accepted: 14.04.2020

Published online: 29.05.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-195-203>

УДК 725.1:620.9

Пространственная организация объектов энергетики: особенности и перспективы развития (на примере белорусской практики)

Докт. арх., проф. Е. Б. Морозова¹⁾, канд. арх., доц. А. А. Колесников²⁾,
канд. арх. Н. Н. Коршунова²⁾, канд. арх. О. Е. Долинина¹⁾

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

²⁾Российский университет дружбы народов (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье рассматривается пространственная организация объектов энергетики с акцентом на современную практику Республики Беларусь. Эффективность функционирования предприятий любой отрасли, в том числе энергетической, в значительной степени обусловлена их архитектурно-планировочной организацией. Знание механизмов и особенностей происходящих здесь изменений дает возможность обосновывать перспективную стратегию проектной деятельности, а значит, позволяет управлять процессами развития отрасли и тем самым избежать многих негативных последствий. Объекты энергетики являются типологической группой промышленной архитектуры, их формирование началось в связи с переходом промышленного производства на электрическую энергию. Сегодня типология отражает функциональный подход в архитектурном формообразовании, включает достаточно большое многообразие составляющих единиц и демонстрирует тенденцию к диверсификации. В Беларуси объекты энергетики в архитектурном аспекте их классификации были представлены достаточно ограничено, основную массу составляли теплофикационные электростанции, работающие на разных видах топлива. В настоящее время диверсификация получила развитие в таких направлениях, как строительство объектов гидроэнергетики (малые станции на водохранилищах и станции средней мощности, низконапорные, русловые, на реках), альтернативной энергетики (ветроэлектростанции, фотоэлектрические станции и биогазовые установки) и традиционной энергетики (ТЭС и мини-ТЭЦ на возобновляемом топливе). Охарактеризованы результаты белорусской практики строительства объектов всех направлений (гидроэнергетика, альтернативная и традиционная энергетика), особенности архитектурно-планировочной организации объектов на современном этапе, корреляция с общемировыми тенденциями развития промышленной архитектуры. Определены типологические признаки архитектуры объектов альтернативной энергетики, возможности и направления практической реализации архитектурных подходов, проблемы и перспективы развития научного сопровождения проектного процесса.

Ключевые слова: промышленная архитектура, объекты энергетики, пространственная организация, архитектурно-планировочная структура, архитектурная типология

Для цитирования: Пространственная организация объектов энергетики: особенности и перспективы развития (на примере белорусской практики) / Е. Б. Морозова [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 195–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-195-203>

Spatial Organization of Energy Facilities: Specific Features and Development Prospects (on the Example of Belarusian Practice)

Y. B. Morozova¹⁾, A. A. Kolesnikow²⁾, N. N. Korshunova²⁾, O. E. Dolinina¹⁾

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

²⁾RUDN University (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The paper considers spatial organization of energy facilities with an emphasis on modern practice of the Republic of Belarus. The efficiency of enterprise operation in any industry including power industry is largely due to their architectural and planning organization. Knowledge of mechanisms and specific features of the changes taking place here makes it possible

Адрес для переписки
Морозова Елена Борисовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-29
poak.af@bntu.by

Address for correspondence
Morozova Yelena B.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-29
poak.af@bntu.by

to justify a promising strategy for project activities, and therefore, it allows to manage development processes of the industry and thereby avoid many negative consequences. Energy facilities are a typological unit of industrial architecture, their formation has been started due to transition of industrial production to electric energy. Today the typology shows functional approach in architectural shaping, it includes a fairly large variety of constituent units and demonstrates a tendency towards diversification. In Belarus energy facilities in the architectural aspect of their classification are limited mostly to thermal power plants operating on different types of fuel. Currently the diversification is developing in the following areas: construction of hydropower facilities (small plants on reservoirs, medium power plants, low-pressure plants, run-of-the-river hydraulic power stations), alternative energy (wind power stations, photovoltaic power stations and biogas plants) and conventional energy (thermal power plant, mini-combined heat and power plant operating on renewable fuel). The results of Belarusian practice in construction of all types of facilities (hydropower, alternative and conventional energy), peculiarities of the architectural and planning organization of facilities at the current stage, correlation with global trends in the development of industrial architecture have been characterized in the paper. The paper has determined typological features of alternative energy facility architecture, opportunities and directions for implementation of architectural approaches, problems and prospects to develop scientific support for the project process.

Keywords: industrial architecture, energy facilities, spatial organization, architectural and planning structure, architectural typology

For citation: Morozova Y. B., Kolesnikow A. A., Korshunova N. N., Dolinina O. E. (2020) Spatial Organization of Energy Facilities: Specific Features and Development Prospects (on the Example of Belarusian Practice). *Science and Technique*. 19 (3), 195–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-195-203> (in Russian)

Введение

Объекты энергетики – это типологическая группа промышленной архитектуры, отражающая функциональный подход в ее формообразовании и включающая достаточно большой и разнообразный объем составляющих единиц [1]. Перечень этих единиц демонстрирует в настоящее время тенденцию к диверсификации в связи с введением в производство новых видов топлива, с естественной трансформацией сложившихся технологий, а также изменившимся отношением в обществе к проблемам экологии, использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Все это в совокупности с новыми реалиями в организации и материально-технической базе строительства, а также под влиянием общемировых тенденций современного развития архитектуры производства изменяет подходы к пространственному формированию объектов энергетики.

Исследование данных процессов становится необходимым условием будущего строительства, поскольку эффективность функционирования объектов в значительной степени обусловлена их архитектурно-планировочной организацией. Кроме того, знание механизмов и особенностей происходящих изменений в пространственной структуре энергетических объектов дает возможность обосновывать перспективную стратегию проектной деятельности, а значит, позволяет управлять процессами развития отрасли и тем самым избежать многих

негативных последствий. Это отвечает современной парадигме познания, в соответствии в которой научные теории и концепции выступают как детерминанты получаемого знания, не только влияющие на действительность, но и формирующие ее [2].

В условиях Республики Беларусь основные объекты энергетики в архитектурном аспекте их классификации традиционно представлялись промышленными и отопительными теплофикационными электростанциями, работающими на разных видах топлива (уголь, торф, газ, мазут). Они осуществляли комбинированную выработку электрической энергии и имели, как правило, государственную юрисдикцию. Архитектурно-планировочная организация этих объектов отражала, с одной стороны, принятые технологические схемы получения продукции (электрической энергии, теплоты, горячей воды), а с другой – имевшие место технические и архитектурно-градостроительные возможности строительной индустрии, в том числе и художественные подходы к формированию их объемно-планировочной структуры. Начавшиеся в 1990-е гг. перестроечные процессы затронули промышленность как сферу хозяйственно-экономической деятельности государства и соответственно отразились на пространственной материализации ее объектов, т. е. на промышленной архитектуре. Практически на 10–15 лет приостановилось новое строительство, а все усилия сосредоточились на реорганизационных и реконструкционных мероприятиях, необхо-

димых для поддержания самого существования промышленного производства в республике.

В этом плане энергетическая отрасль имела особое положение, поскольку ее необходимость не могла быть подвергнута сомнению и именно от нее во многом зависела стабилизация промышленного комплекса, не говоря уже об обеспечении требуемых условий жизнедеятельности населения страны. В связи с этим процессы развития и закономерного изменения в пространственной организации объектов энергетики продолжали идти, а потребность обеспечить энергетическую независимость страны инициировала их темпы и определяла направления. Что представляет пространственная организация объектов энергетики сегодня, как она коррелируется с общемировыми тенденциями, какие задачи определяют ее будущее – это актуальная задача современных проблемно-типологических исследований в архитектуре.

Основная часть

Современная типология объектов энергетики начала формироваться в связи с использованием в промышленном производстве электрической энергии. Заводы, полностью перешедшие на такой вид энергии, появились уже в начале XX в. (одна из первых – фабрика Акмэ в Пендлбери, Великобритания, 1905) [3, с. 68]. До этих пор в технологическом процессе действовала паровая энергия, и ее выработка осуществлялась в рамках отдельного предприятия, потребности в наличии самостоятельных объектов не существовало, хотя такая практика в отдельных случаях с малыми производствами была возможна. Получение же электрической энергии на каждом предприятии оказалось крайне дорогостоящим, и это выделило электростанции в отдельный самостоятельный объект [4]. Параллельно с этим обоснование для выделения нового объекта предоставило и городское хозяйство, переведя обеспечение бытовых нужд населения на данный вид энергии.

Разные способы получения электрической энергии сформировали в мировой практике две типологические группы энергетических объектов – гидроэлектростанции (ГЭС) и тепловые

электростанции (ТЭС), в середине XX в. к ним добавилась третья группа – атомные электростанции (АЭС). Среди объектов промышленной архитектуры они вошли в группу предприятий, пространственная организация которых напрямую зависела от технологии процесса получения продукта. Две системы, основополагающие формирование всех объектов промышленной архитектуры, – система машины и система человека – в этой области производства разделились и в пространственной организации стали играть разные роли, при этом технологические и технические факторы были определяющими, доминантными [5]. В целом такое положение сохраняется и сегодня.

Так что же существенно изменилось в архитектуре объектов энергетики в Беларуси к настоящему времени? Прежде всего следует признать значительное расширение типологических единиц, которое стало заметно последние 10–15 лет. В промышленной архитектуре в классификационных построениях основным всегда использовался функциональный подход [5]. Согласно ему были выделены все имеющиеся сегодня отраслевые группы предприятий, в том числе и сами объекты энергетики. В то же время в рамках каждой отрасли функциональные критерии оказались не единственными, к ним добавились конструктивные, объемно-пространственные и др. Тотальная унификация производственного пространства и его адекватность не процессу, а будущим изменениям, позиционируются как одна из современных тенденций развития промышленной архитектуры [5], что при проектировании промышленных зданий может привести к отмене отраслевых, а следовательно, и функциональных ограничений. Тем не менее в энергетической отрасли из-за крайне жесткой обусловленности пространства технологией и оборудованием по-прежнему сохраняется приоритетность функционального подхода. Поэтому типология новых объектов здесь определяется способом получения продукта и конкретно – видом топлива или источника энергии. В связи с этим диверсификация объектов в Беларуси получила развитие в таких направлениях, как строительство объектов гидроэнергетики, альтернативной и традиционной энергетики.

ступного потенциала водотоков, что, безусловно, свидетельствует о больших возможностях в этой области [7].



Рис. 2. Гродненская гидроэлектростанция

Fig. 2. Grodno hydroelectric power plant

Строительство гидротехнических станций, особенно при использовании небольших водотоков, обеспечивает получение электроэнергии одним из наиболее экономичных и экологически безопасных способов, поскольку отсутствуют вредные выбросы в атмосферу, не подвергается деградации природный ландшафт, обеспечиваются относительно низкая себестоимость производимой электроэнергии (примерно в 10 раз меньше вырабатываемой на ТЭЦ) и высокая маневренность при снабжении электроэнергией потребителей.

Альтернативная энергетика

Объекты альтернативной энергетики сегодня идентифицируются по ресурсным источникам, и их перечень достаточно разнообразный. В Беларуси они представлены только тремя, однако широко распространенными в мировой практике типологическими единицами – ветроэлектростанциями (ВЭС) (99), солнечными, или фотоэлектрическими, станциями (55) и биогазовыми энергетическими установками (25).

Новогрудская ветроэлектрическая станция, включающая шесть ветроустановок, является крупнейшей и первой промышленной в республике (рис. 3). Первая фотоэлектрическая станция находится в Костюковичах на территории площадью 3 га, а самая мощная в стране станция расположена в Речицком районе на площади 110 га (рис. 4). Самая крупная в Беларуси и одна из крупнейших в Европе биогазовая установка возведена в Кировском районе – в ОАО «Рассвет им. К. П. Орловского».



Рис. 3. Новогрудская ветроэлектростанция

Fig. 3. Novogrudok wind power plant



Рис. 4. Фотоэлектростанция в Речицком районе

Fig. 4. Photo power plant in Rechitsky region

Пространство объектов альтернативной энергетики формируется объемами двух типов – инженерным оборудованием и техническими сооружениями. Первые не входят в сферу деятельности архитектора, они разрабатываются с учетом методологических подходов предметного дизайна (технической эстетики) и монтируются на площадке. Так, например, возведены все ветроэнергетические установки. При этом для обслуживания оборудования не требуется постоянный персонал, что исключает необходимость строительства производственных или административно-бытовых корпусов. Тем не менее полностью дистанцироваться от решения архитектурных задач в случае с ветроэнергетическими объектами нельзя. Высота ветряков – около 80 м, они устанавливаются на открытой площадке, свободно и без ограждения, хорошо просматриваются в пространстве и являются определенной высотной доминантой природно-антропогенного ландшафта. Кроме того, такие технически совершенные объекты очень притягательны для людей, они вызывают интерес у проезжающих и у находящихся рядом, неслучайно Новогрудская ВЭС стала достаточно посещаемым местом.

Формообразование этих объектов полностью зависит от технических составляющих,

и это закономерно отражает современную тенденцию развития промышленной архитектуры – ее поляризацию на технизированные объекты и объекты, приближающиеся в своем структурно-образном решении к гражданской архитектуре [8]. В то же время архитектурной задачей является планировочная организация ветроустановок в пространстве вместе с прилегающей территорией, ее функциональное и структурное заполнение. Эта задача становится особенно актуальной в случае не одиночной, а групповой установки ветряков, как, например, на Новогрудской ВЭС.

Пространственная организация фотоэлектрических станций также формируется инженерным оборудованием, причем в отличие от ветроустановок эти объекты не имеют высотных характеристик, не притягательны для населения, поскольку представляют собой достаточно большие территории, занятые однотипными, расположенными с наклоном светоплавляющими панелями. К тому же такие площадки, как правило, огораживаются и не имеют свободного доступа. Тем не менее они включены в ландшафт, воспринимаются панорамно, на расстоянии, с движущегося транспорта, поэтому архитектурные аспекты их проектирования могут рассматриваться на уровне планировочной и пространственной организации больших территорий, например схемы комплексной территориальной организации районов и областей.

Биогазовые энергетические установки состоят из технических сооружений, являющихся объектом промышленной архитектуры, и представляют собой объем, возведенный строительными методами и занятый производственным процессом без непосредственного участия в нем людей. Как типологическая группа технические сооружения имеют достаточно продолжительную историю своего развития и уже сложившуюся типологию, расширение которой тем не менее возможно и в настоящее время [9]. В соответствии с этой типологией составляющие биогазовых установок входят в группу емкостных сооружений и отличаются достаточно развитыми объемно-пространственными и масштабными характеристиками, позволяющими им участвовать не только в пространственном, но и в образном формировании среды благодаря своим размерам и крупномасштабной форме (рис. 5).



Рис. 5. Биогазовая установка

Fig. 5. Biogas plant

Сегодня активное внедрение в республике объектов альтернативной энергетики обнаружил дистанцирование отечественной архитектурной практики от участия в данном процессе. С одной стороны, это можно объяснить сравнительно недавним обращением к строительству таких объектов, но с другой – следует признать, что отставание в теоретическом обосновании и осмыслении архитектурных вопросов их организации может стать причиной определенных ошибок в практическом строительстве. Кроме того, энергетические объекты такого типа в связи с их небольшой мощностью могут находиться в собственности частных инвесторов, например в Новогрудском районе из 13 ветроустановок таких семь. Это обуславливает особую необходимость разработки обоснованных рекомендаций, касающихся архитектурных аспектов проектирования данных объектов.

Традиционная энергетика

Данную группу представляют теплоэлектростанции, основная часть которых (более 90 %) сегодня работает на природном газе. История тепловых станций началась в 1930 г. пуском работающей на торфе Белорусской ГРЭС в поселке Ореховск Оршанского района. За прошедшее время объемно-планировочная структура ТЭС окончательно сложилась и практически постоянна: параллельное размещение двух одноэтажных объемов больших размеров – машинного зала и котельной, разделенных ярусной вставкой деаэрационного отделения; обязательное присутствие постоянного и временного торца основного корпуса; несколько вариантов расположения административно-бытового блока на площадке; как правило, «нижнее» расположение дымовых труб (возможно и «верхнее» расположение). Эти архитектурные особенности являются общими в мировой практике, и благодаря им объекты такого типа узнаваемы в любой стране.

Наиболее показательной сегодня в отечественной практике является Минская ТЭЦ-5 (проектные работы – РУП «Белнипиэнергопром»), находящаяся в 25 км от Минска в поселке Дружный. Особенность предприятия состояла в том, что еще в 1980-е гг. на этой площадке недалеко от Руденска было начато возведение первой атомной теплоэлектростанции Белорусской энергосистемы. После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. строительство остановили, потребовалось разработать новое архитектурно-планировочное решение с учетом проведенных прежде работ. Перепрофилированный объект вновь ввели в эксплуатацию в 1999 г., а в 2011-м был запущен второй энергоблок.

Весь комплекс станции выполнен строго в соответствии с типологическим форматом объектов такого рода. Корпуса разных размеров формируют многоступенчатую композицию, которую отличают хорошие пропорции, лаконичное использование цвета и масштабного строя деталей – формы и размеров оконных проемов, вынесенных лестниц и оборудования. В объемно-планировочной композиции таких объектов значимую роль играют технические сооружения, и прежде всего градирни и дымовые трубы. Это имеет место и в архитектуре ТЭЦ-5: ее дымовая труба высотой 240 м является значительной доминантой в окружающей среде. Станция демонстрирует возможности современной промышленной архитектуры, которая, как писал известный польский ученый Б. Лисовский, относится к так называемой неофициальной архитектуре, и именно она «отражает жизнь во времени и пространстве» [10, с. 47] (рис. 6).



Рис. 6. Минская ТЭЦ-5

Fig. 6. Minsk thermal power plant No 5

Значимым и удачным отечественным опытом является реконструкция уже существующих ТЭС, проходящая в рамках модернизации этих объектов (Минская ТЭЦ-3 (рис. 7), Гродненская ТЭЦ-2 (рис. 8), Гомельская ТЭЦ-1; проектные работы – РУП «Белнипиэнергопром»).



Рис. 7. Минская ТЭЦ-3

Fig. 7. Minsk thermal power plant No 3



Рис. 8. Гродненская ТЭЦ-2

Fig. 8. Grodno thermal power plant No 2

Во внешнем облике это демонстрируют прежде всего фасады главного производственного и административно-бытового корпусов – новые материалы, цветовое решение, пластика деталей. Композиция всего комплекса может трансформироваться за счет замены технических сооружений, например башенных градирен вентиляторными. Возможно значительно снизить высоту дымовой трубы за счет использования новых технических систем дымоудаления. Однако такие работы в связи с их затратностью нецелесообразно проводить при реконструкции, в то же время в проектах новых ТЭС они уже используются, например в проекте Воронежской ТЭЦ-1 (проектные работы – РУП «Белнипиэнергопром») (рис. 9).

Несмотря на устоявшуюся сегодня практику строительства ТЭС, в области традиционной энергетики изменения все же имеют место. В республике получила развитие новая типологическая единица – мини-ТЭЦ, работающая на возобновляемом топливе – древесине и ее отходах. В настоящее время таких станций возведено более 20, одни из них используют только возобновляемые источники (Петриков-

ская мини-ТЭЦ), другие имеют смешанную технологию – сочетание древесной щепы с фрезерным торфом (Речицкая, Лунинецкая и Пружанская мини-ТЭЦ).



Рис. 9. Воронежская ТЭЦ-1

Fig. 9. Voronezh thermal power plant No 1

С архитектурной точки зрения, мини-ТЭЦ представляют собой малообъектную застройку, достаточно разнообразную в объемно-пространственном отношении, с большим количеством вынесенных технологических элементов. Сложилась практика монтажа оборудования до завершения и закрытия объема машинного зала, что обусловило применение только полносборной каркасной системы из металлических элементов и легких навесных панелей наружного ограждения. Разнообразие вынесенного оборудования, яркие цвета стеновых панелей, относительно небольшой масштаб объемов позволили создавать архитектуру хорошего качества, что, безусловно, делает отечественные объекты в этом секторе промышленной архитектуры передовыми (рис. 10, 11).



Рис. 10. Лунинецкая мини-ТЭЦ

Fig. 10. Luninets mini-thermal power plant

В ближайшее время в Гродненской области будет запущена Белорусская АЭС. В связи с уникальностью такого объекта вопросы особенностей его архитектурно-планировочной организации и возможные в этой области перспективы пока не имеют оснований для исследования.



Рис. 11. Пружанская мини-ТЭЦ

Fig. 11. Pruzhany mini-thermal power plant

ВЫВОДЫ

1. Объекты энергетики являются типологической группой промышленной архитектуры, отражают функциональный подход в ее формировании и включают достаточно большое многообразие составляющих единиц. Эффективность функционирования объектов энергетики в значительной степени обусловлена их пространственной организацией, которая закономерно трансформируется во времени в связи с введением в производство новых видов топлива, развитием сложившихся технологий, с изменившимся отношением в обществе к проблемам экологии, использования природных ресурсов и охраны окружающей среды.

2. В Беларуси объекты энергетики в архитектурном аспекте их классификации были представлены достаточно ограничено, основную массу составляли теплофикационные электростанции, работающие на разных видах топлива (уголь, торф, газ, мазут). Архитектурно-планировочная организация этих объектов отражала принятые технологические схемы получения электрической и тепловой энергии, имевшие место технические возможности строительной индустрии и архитектурно-градостроительные, в том числе и художественные подходы к формированию их объемно-планировочной структуры. Несмотря на стагнацию в области промышленного строительства в 1990-е гг., вызванную процессами социально-экономических и политических преобразований, развитие архитектуры энергетических объектов продолжалось, а потребность обеспечения энергетической независимости страны инициировала его темпы и определяла направления.

3. Архитектурная типология объектов энергетики сегодня демонстрирует тенденцию к диверсификации и в связи с сохраняющейся приоритетностью функционального подхода и обусловленностью пространственной организации технологией и оборудованием развивается в следующих направлениях: объекты гидроэнергетики – малые станции на водохранилищах и станции средней мощности (низконапорные, русловые) на реках; альтернативной энергетики – ветроэлектростанции, фотоэлектрические станции и биогазовые установки; традиционной энергетики – ТЭС и мини-ТЭЦ на возобновляемом топливе.

4. Охарактеризованы результаты белорусской практики строительства объектов всех направлений (гидроэнергетика, альтернативная и традиционная энергетика). Выявлены особенности архитектурно-планировочной организации объектов на современном этапе, их корреляция с общемировыми тенденциями развития промышленной архитектуры. Определены типологические признаки архитектуры объектов альтернативной энергетики, возможности и направления практической реализации архитектурных подходов, проблемы и перспективы развития научного сопровождения проектного процесса.

5. Объекты промышленной архитектуры, в том числе энергетики, представляя активную часть средств производства человеческого общества, тем самым определяют экономическую и политическую безопасность государства. Исследования пространственной организации промышленных объектов в историческом дискурсе их формирования и научно обоснованные рекомендации в этой области становятся необходимым условием дальнейшего развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, Н. Н. Промышленная архитектура / Н. Н. Ким. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1988. 244 с.
2. Дженкс, Ч. Новая парадигма в архитектуре / Ч. Дженкс // Проект International. 2002. № 5. С. 98–112.
3. Winter, J. A. *Industrial Architecture: a Survey of Factory Building* / J. A. Winter. London: Studio Vista, 1970. 128 p.
4. Bradley, B. H. *The Works: the Industrial Architecture of the United States* / B. H. Bradley. NY, Oxford: Oxford University Press, 1999. 347 p.
5. Морозова, Е. Б. Эволюция промышленной архитектуры / Е. Б. Морозова. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.

6. Морозова, Е. Б. Промышленное здание в истории архитектуры / Е. Б. Морозова. Минск: БНТУ, 2017. 302 с.
7. Об утверждении Государственной программы «Энергосбережение» на 2016–2020 годы [Электронный ресурс] // Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28.03.2016 № 248. Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. Режим доступа: <http://www.government.by/ru/solutions/2448>. Дата доступа: 28.01.2020.
8. Морозова, Е. Б. Промышленная архитектура Беларуси в контексте общемирового процесса развития / Е. Б. Морозова // Архитектура и строительные науки. 2008. Т. 8, № 1. С. 5–10.
9. Костов, К. Архитектура инженерных сооружений и промышленного интерьера / К. Костов; Н. Н. Теневои, Н. М. Рудь; под ред. В. А. Цветкова и В. В. Блохина. М.: Стройиздат, 1983. 309 с.
10. Lisowski, B. *The Map of Industrial Architecture – a Systematic Approach* / B. Lisowski // *Aspects on Industrial Architecture and Engineering*. Helsinki: the Building Book Ltd., 1989. P. 29–49.

Поступила 30.12.2019

Подписана в печать 03.03.2020

Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. Kim N. N. (1988) *Industrial Architecture*. 2nd ed. Moscow, Stroyizdat Publ. 244 (in Russian).
2. Jenks Ch. (2002) A New Paradigm in Architecture. *Project International*, (5), 98–112.
3. Winter J. A. (1970) *Industrial Architecture: a Survey of Factory Building*. London, Studio Vista. 128.
4. Bradley B. H. (1999) *The Works: the Industrial Architecture of the United States*. NY, Oxford, Oxford University Press. 347.
5. Morozova E. B. (2006) *The Evolution of Industrial Architecture*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).
6. Morozova E. B. (2017) *Industrial Building in the History of Architecture*. Minsk, Belarusian National Technical University. 302 (in Russian).
7. About Approval of the State Program “Energy Saving” for 2016–2020. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated on 28.03.2016 No 248. *The National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.government.by/ru/solutions/2448>. (Accessed 28 January 2020) (in Russian).
8. Morozova E. B. (2008) Belarusian Industrial Architecture in the Context of Global Development. *Arkhitektura i Stroitelnye Nauki* [Architecture and Construction Sciences], 8 (1), 5–10 (in Russian).
9. Kostov K., Tenevoi N. N., Rud N. M. (1983) *Architecture of Engineering Structures and Industrial Interiors*. Moscow, Stroyizdat Publ. 309 (in Russian).
10. Lisowski B. (1989) The Map of Industrial Architecture – a Systematic Approach. *Aspects on Industrial Architecture and Engineering*. Helsinki, the Building Book Ltd., 29–49.

Received: 30.12.2019

Accepted: 03.03.2020

Published online: 29.05.2020

Модифицирование керамического кирпича добавками неорганических техногенных продуктов водоподготовки ТЭЦ

Канд. техн. наук, доц. А. С. Ковчур¹⁾, чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег²⁾, докт. техн. наук, доц. В. И. Жорник³⁾, С. А. Ковалева³⁾

¹⁾Витебский государственный технологический университет (Витебск, Республика Беларусь),

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

³⁾Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020

Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Отходы теплоэлектростанций представляют собой определенную опасность для окружающей среды, а следовательно, и экономические проблемы. Однако в таких отходах содержатся вещества, которые целесообразно использовать для производства строительно-отделочных материалов. Техногенные продукты водоподготовки с теплоэлектростанции «Южная» (осадки химводоподготовки – код 8410500) являются кальцитовой смесью, содержащей более 64 мас. % кальцита. Минералогический состав неорганических отходов определен с помощью рентгенографических и инфракрасных (ИК) спектральных исследований. Механическая активация кальцитовых неорганических отходов приводит к измельчению кальцита и уменьшению количества адсорбированной воды, что влияет на увеличение содержания каркасных структур диоксида кремния, реакционная способность которого напрямую зависит от их количества. Изменения структуры диоксида кремния при механической активации установлены по данным ИК-исследований. Результаты рентгенографических и ИК-исследований глины месторождения «Заполье», используемой в технологии производства керамического кирпича, позволяют отнести ее к сырью с высокой реакционной способностью. В ОАО «Обольский керамический завод» с добавками кальцитовых неорганических отходов теплоэлектростанции произведена опытная партия керамического кирпича. Выполнен рентгеноструктурный анализ образцов полученных кирпичей стандартного состава и с добавками отходов. Исследовано влияние содержания кальцитовых неорганических отходов в исходном сырье на процессы структурообразования керамического кирпича. Добавление в шихту на основе глины месторождения «Заполье» отходов химводоподготовки, содержащих карбонат кальция до 15 мас. %, способствует снижению температуры обжига и появлению расплава. Это приводит к процессам кристаллизации твердых минералов из расплава и увеличению количества стеклофазы, способствующей повышению прочностных свойств керамического кирпича. Установлена возможность использования неорганических отходов (осадков химводоподготовки – код 8410500) теплоэлектростанций в качестве компонента отощающих добавок в глинистое сырье в технологическом процессе производства керамического кирпича.

Ключевые слова: осадки химводоподготовки, отходы, карбонат кальция, алюмосиликат, минералогический состав, механическая активация, фазовый состав, рентгенофазовый анализ, ИК-спектроскопия

Для цитирования: Модифицирование керамического кирпича добавками неорганических техногенных продуктов водоподготовки ТЭЦ / А. С. Ковчур [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 204–214. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-204-214>

Modification of a Ceramic Brick Additives of Inorganic Technogenic Products of Water Treatment of Combined Heat and Power Plant

A. S. Kauchur¹⁾, V. K. Sheleh²⁾, V. I. Zhornik³⁾, S. A. Kovaliova³⁾

¹⁾Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Republic of Belarus),

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

³⁾The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Waste of combined heat and power plants represents a certain danger to the environment, and hence the economic problems. However such waste contains substances that are advisable to use for production of construction and finishing

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

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

materials. Technogenic products of water treatment from the Yuzhnaya combined heat and power plant (sludges of chemical water treatment – code 8410500) are a calcite mixture containing more than 64 wt. % calcite. The mineralogical composition of inorganic waste has been determined while using X-ray and IR-spectral researches. Mechanical activation of calcite inorganic wastes leads to grinding of calcite and a decrease in the amount of adsorbed water, which affects the increase in the content of silica frame structures, the reactivity of which directly depends on their quantity. Changes in the structure of silicon dioxide during mechanical activation are established according to IR studies. The results of X-ray and IR studies of the Zapolye deposit clay used in ceramic brick production technology make it possible to attribute it to raw materials with high reactivity. An experimental batch of ceramic bricks has been produced at JSC “Obolsky Ceramic Plant” with addition of calcite inorganic waste from combined heat and power plants. An X-ray diffraction analysis of samples of the obtained bricks having standard composition and with addition of waste has been carried out. The influence of calcite inorganic waste content in the feedstock on the process of ceramic brick structure formation has been studied in the paper. Addition of chemical water treatment waste containing calcium carbonate up to 15 wt. % to the Zapolye clay mixture helps to reduce a firing temperature and an appearance of the melt. This leads to crystallization processes of solid minerals from the melt and an increase in the amount of glass phase which contributes to improvement of strength properties in ceramic bricks. The possibility of using inorganic waste (sludges of chemical water treatment – code 8410500) of combined heat and power plants as a component of emaciated additives in clay raw materials in the process of ceramic brick production has been established in the paper.

Keywords: water treatment sludges, waste, calcium carbonate, aluminosilicate, mineralogical composition, mechanical activation, phase composition, X-ray phase analysis, infra-red spectroscopy

For citation: Kauchur A. S., Sheleh V. K., Zhornik V. I., Kovaliova S. A. (2020) Modification of a Ceramic Brick Additives of Inorganic Technogenic Products of Water Treatment of Combined Heat and Power Plant. *Science and Technique*. 19 (3), 204–214. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-204-214> (in Russian)

Введение

Сырьевой базой для производства продукции строительного назначения – керамического кирпича марки КРО-300/15 – в ОАО «Обольский керамический завод» является глина месторождения «Заполье» (Витебская область). По своим свойствам сырье относится к группе полукислых глин с умеренной пластичностью, с высоким содержанием оксида железа Fe_2O_3 (6 %) и карбонатными включениями. Глина месторождения «Заполье» – легкоплавкое, слабоспекающееся сырье, имеющее огнеупорность 1280 °С и температуру обжига в диапазоне от 900 до 1100 °С. Кирпич, изготовленный из такой глины, характеризуется повышенной плотностью и малым термическим сопротивлением, но имеет пониженный показатель водопоглощения. Уменьшение марочной прочности изделия, образование трещин и коробление в процессе сушки и обжига кирпича происходят в основном из-за усадки. Для устранения этих недостатков и придания дополнительных свойств изделию необходимо вводить отошающие и выгорающие добавки в исходное сырье. В качестве отошающих добавок используют кварцевый песок, молотые отходы керамического производства (шамот, молотый кирпич размерами частиц 0,5–5,0 мм), тонкомолотый гранитный отсев, полевой шпат. Отошающие добавки способствуют уменьшению пластичности глины и связыванию воды.

В ряде случаев использование отходов промышленного производства позволяет заменить природные ресурсы [1]. Наряду с этим, приме-

нение техногенного сырья решает важную экологическую проблему загрязнения окружающей среды, позволяет уменьшить затраты на производство строительных материалов по сравнению с производством из природного сырья [2]. Известны также результаты зарубежных исследований [3, 4], которые свидетельствуют о мировых тенденциях в индустрии отделочно-строительных материалов, рассматривающих перспективность применения осадков химводоподготовки при изготовлении керамического кирпича. К примеру, химический состав бразильских отходов химводоподготовки близок к составу глины и в технологии производства кирпича позволяет ее частично заменить без добавления песка и шамота. Высокое содержание органических веществ повышает пористость получаемых изделий [4]. Во многих случаях химводоподготовка на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) осуществляется с использованием коагулянта и осадителя, в качестве которых применяются доступные компоненты, такие как железный купорос $FeSO_4$ и гашеная известь $Ca(OH)_2$. Известь, как нейтрализующий агент, применяется довольно широко. Однако до сих пор нет соответствующих технических нормативных правовых актов, регламентирующих ее состав и свойства как осадителя. Поэтому используется обычная строительная известь, а это – большой ее перерасход, что отражается на фазовом составе шлама.

Авторы статьи изучали возможность использования неорганических отходов химической водоподготовки (осадков химводоподготовки –

код 8410500) с ТЭЦ «Южная» ОАО «Витязь» (г. Витебск) в качестве отощающей добавки к глинистому сырью месторождения «Заполье». По результатам химического анализа установлен состав прокаленных неорганических отходов [2]: Fe^{3+} – 24–35 %, Ca^{2+} – 32–34 %, Mg^{2+} – 12–14 %, SiO_2 – 32–17 %. Содержание микроэлементов (ртути, вольфрама, стронция, германия, кадмия и др.) в шламе соответствует требованиям санитарных норм, и сырье может быть рекомендовано к использованию для получения керамических изделий. В связи с этим исследования процессов изменения структуры и свойств керамического кирпича при добавлении шлама под влиянием механической и последующей термической обработки представляют определенный интерес. Так, в ходе высокоэнергетической механической активации генерируются высокие динамические локальные давления, которые могут приводить к изменению структуры обрабатываемых веществ и увеличению их реакционной способности [5].

Материалы и методы исследований

В экспериментах использовали сухую сыпучую крупнодисперсную смесь размерами частиц 0,2–1,5 мм неорганических отходов продувочной воды желто-коричневого цвета ТЭЦ «Южная». Образцы высушивали при нормальных условиях и дополнительной термической обработке не подвергали. Механическую активацию проводили в планетарной шаровой мельнице «Активатор-2S» (пр-во ЗАО «Активатор», г. Новосибирск) в воздушной атмосфере с водяным охлаждением барабанов. Скорость вращения барабанов 1132 об/мин при соотношении частот вращения планетарного диска и барабанов 1:2. Масса стальных шаров диаметром 8 мм – 400 г, масса активируемой смеси – 60 г. Длительность обработки составляла 5–20 мин. Неорганические отходы в количественном отношении 5, 10 и 15 мас. % добавляли в состав шихты при изготовлении опытных образцов керамического кирпича. Основа шихты – глинистая порода светло-коричневого цвета месторождения «Заполье» с крупнодисперсной структурой. Оксидный состав глинистого сырья следующий, мас. %: SiO_2 – 55,7; Al_2O_3 – 14,0; Fe_2O_3 – 6,1; TiO_2 – 0,9; CaO – 7,2; MgO – 2,4; SO_3 – 0,2; Na_2O – 1,5; K_2O – 2,8; примеси – 9,2. Образцы керамического кирпича изготовлены по технологическому регламенту № TP1-2016

ОАО «Обольский керамический завод» с использованием метода пластического формования под давлением 25 МПа при влажности шихты 20–24 % и температуре обжига 1000 °С.

Фазовый состав определяли рентгеновским методом на дифрактометре D8 ADVANCE (Германия) с использованием характеристического излучения медного анода рентгеновской трубки CuK_α (K_α – линия в энергетическом спектре меди с длиной волны 1,5418 Å) и конфигурации съемки Брэгга – Brentano Θ – 2Θ . Порошки исследуемых образцов отходов химводоподготовки и кирпича прессовались в плоские кюветы. Сканирование проводили при температуре 20 °С и в интервале углов 2Θ от 10° до 120° с шагом 0,05° и временем интегрирования рентгеновских квантов в каждой точке 3 с. Фазовый анализ выполняли с применением производственного обеспечения (ПО) EVA и базы рентгенографических стандартов ICDD PDF-2, рентгеноструктурный анализ – с применением ПО TOPAS (Bruker) по методике, основанной на аппроксимации профиля линий расчетной и экспериментальной дифрактограммы с помощью метода наименьших квадратов. Уточнение параметров осуществляли для многофазных систем по всему профилю дифрактограммы с учетом наложения пиков, фона и разделения вкладов микроструктурных параметров. В ПО TOPAS использовали подход double-Voigt для анализа уширения пика. Полуколичественный анализ (мас.) выполняли методом Ритвельда [6]. Изучение структурного состава вещества проводили с использованием метода инфракрасной спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре Nicolet iS10 (США) с приставкой неполного внутреннего отражения с кристаллом алмаза. Сканирование производили с разрешением 4 cm^{-1} в диапазоне волновых чисел от 4000 до 400 cm^{-1} .

Механическая активация кальцитовых неорганических отходов

Рентгенофазовые исследования показали (рис. 1), что состав неорганических отходов химводоподготовки ТЭЦ «Южная» представлен преимущественно фазами кварца SiO_2 (PDF-2 № 46-1045 гексагональная сингония, пространственная группа симметрии SG P3221) и кальцита CaCO_3 (PDF-2 № 05-0586 ромбоэдрическая сингония, SG R-3c) в количествен-

ном соотношении 16 и 84 мас. % соответственно. Возможно наличие незначительного количества фаз кальцита магния $(Ca, Mg)CO_3$ (PDF-2 № 43-0697, SG R-3c). При механической активации длительностью 20 мин изменения фазового состава, по данным рентгенофазового анализа, не происходило. На дифрактограмме рис. 1 отмечается снижение в два раза интенсивности пиков кальцита и их уширение в 2,5 раза. Так, значение полной ширины на половине максимума (FWHM) пика кальцита у исходного образца составляет $FWHM(104) = 0,155^\circ$, а после 20 мин механоактивированного (МА) $FWHM(104) = 0,383^\circ$.

Этот эффект может быть обусловлен как уменьшением размера кристаллитов, так и увеличением уровня микронапряжений, что подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа (табл. 1). Так, при механической активации длительностью 20 мин происходит

значительное измельчение крупных зерен кальцита до размера кристаллитов $L_{CaCO_3} = 29$ нм, а уровень его микронапряжений возрастает от $e_G = 0,2343$ до $e_G = 0,5134$. При этом интенсивность пиков кварца, наоборот, с увеличением длительности обработки возрастает, например для пика (101) – в 2,5 раза по отношению к необработанному, а значение FWHM (101) уменьшается с $0,172^\circ$ до $0,132^\circ$. По данным рентгеноструктурного анализа, и через 20 мин механической активации размер кристаллитов кварца остается достаточно большим (более 200 нм), что не позволяет его достоверно определить, а уровень микронапряжений для кварца, наоборот, уменьшается от $e_G = 0,4250$ до $e_G = 0,1619$, что может свидетельствовать о снижении уровня его дефектности. Параметры решетки фазы кварца также изменяются незначительно (табл. 1).

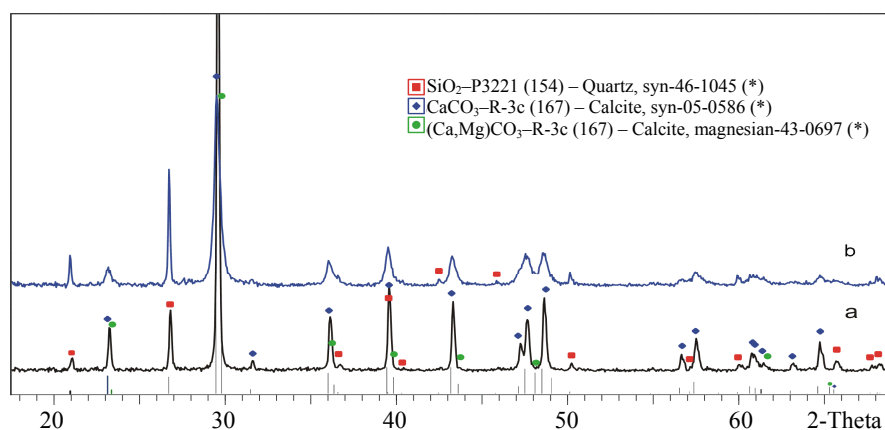


Рис. 1. Дифрактограммы исходного образца отходов водоподготовки ТЭЦ «Южная» (а) и механоактивированного (длительность 20 мин) (б)

Fig. 1. Diffractogram initial specimen of water treatment waste at Yuzhnaya thermal power plant (a) and mechanoactivated specimen (with duration of 20 min) (b)

Таблица 1

Микроструктурные параметры кальцитовых отходов химводоподготовки ТЭЦ «Южная» до и после механической активации

Microstructural parameters for calcite wastes of chemical water treatment at Yuzhnaya thermal power plant prior to and after mechanical activation

Материал	Параметр		
	По PDF-2	Исходный	Механоактивация 20 мин
Кварц SiO_2	$a = 4,9134 \text{ \AA}$ $c = 5,40524 \text{ \AA}$	$a = 4,915(3) \text{ \AA}$ $c = 5,407(1) \text{ \AA}$ $L > 200 \text{ нм}$ $e_G = 0,4250$	$a = 4,915(8) \text{ \AA}$ $c = 5,407(8) \text{ \AA}$ $L > 200 \text{ нм}$ $e_G = 0,1619$
Кальцит $CaCO_3$	$a = 4,989 \text{ \AA}$ $c = 17,062 \text{ \AA}$	$a = 4,988(2) \text{ \AA}$ $c = 17,060(1) \text{ \AA}$ $L > 200 \text{ нм}$ $e_G = 0,2343$	$a = 4,984(1) \text{ \AA}$ $c = 17,040(9) \text{ \AA}$ $L = 29,40 \text{ нм}$ $e_G = 0,5134$

Наличие карбоната кальция в образцах неорганических отходов в модификации кальцита подтверждается данными, полученными с помощью ИК-спектроскопии (рис. 2). Кальцит – пространственная группа $R-3c$, фактор-группа – D_{3d} , группа позиционной симметрии иона CO_3 – $D_3(32)$. ИК-спектр кальцита включает: две сильные полосы поглощения 714 см^{-1} (асимметричные валентные колебания $\nu_{4\text{асим}}$) и 872 см^{-1} (симметричные валентные колебания $\nu_{2\text{сим}}$), очень сильную широкую полосу 1408 см^{-1} ($\nu_{3\text{асим}}$), а также полосы 1793 и 2510 см^{-1} [7]. Другая часть полос связана с диоксидом кремния. Валентные колебания Si–O–Si этих группировок на ИК-спектре имеют интенсивную полосу 1037 см^{-1} . Наличие каркасных структур кристаллического кварца Si–O–Si в образцах идентифицируется по полосе поглощения $1085\text{--}1105\text{ см}^{-1}$. Полосы поглощения 778 и 795 см^{-1} характерны для валентных колебаний Si–O–Si (ν -симметричные) в тетраэдре SiO_4 .

Отличительным свойством кремнезема является то, что частицы, как правило, содержат на поверхности гидроксильные группы у атомов кремния (свободные силанольные группы), связанные взаимными водородными связями, а также сорбированные молекулы воды. Наличие гидроксильных групп и абсорбционной воды в составе образца неорганических отходов подтверждается наличием на ИК-спектре колебаний OH-групп с полосой поглоще-

ния 1625 см^{-1} . Валентным колебаниям OH-групп соответствует полоса $3200\text{--}3750\text{ см}^{-1}$.

Механическая активация длительностью до 20 мин не оказывает значимого влияния на полосы поглощения кальцита, но влияет на структурные изменения диоксида кремния. С увеличением длительности механической активации происходит снижение интенсивности полос поглощения гидроксильных OH-групп при волновых числах 1625 и 3385 см^{-1} . Одновременно с этим увеличивается интенсивность полос поглощения 778 , 795 см^{-1} и 1086 см^{-1} групп Si–O–Si, а широкая полоса перемещается в коротковолновую сторону ($1000\text{--}1200\text{ см}^{-1}$). Можно предположить, что структурные изменения связаны с уменьшением содержания абсорбционной воды.

Как известно, в силикатах элементарная структурная единица – это тетраэдр SiO_4 , в котором атомы кислорода образуют мостиковые Si–O–Si или немостиковые связи Si–O [7, 8]. Наличие в исходном образце без механической активации полос поглощения в интервале $900\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ связано с валентными колебаниями, происходящими в немостиковых связях Si–O [9]. Невысокая интенсивность и «размазанность» пика свидетельствуют как об аморфном состоянии диоксида кремния, так и о небольшом его содержании в пробе. Каркасным структурам SiO_2 и аморфного кремнезема соответствуют полосы в диапазоне $1085\text{--}1105\text{ см}^{-1}$.

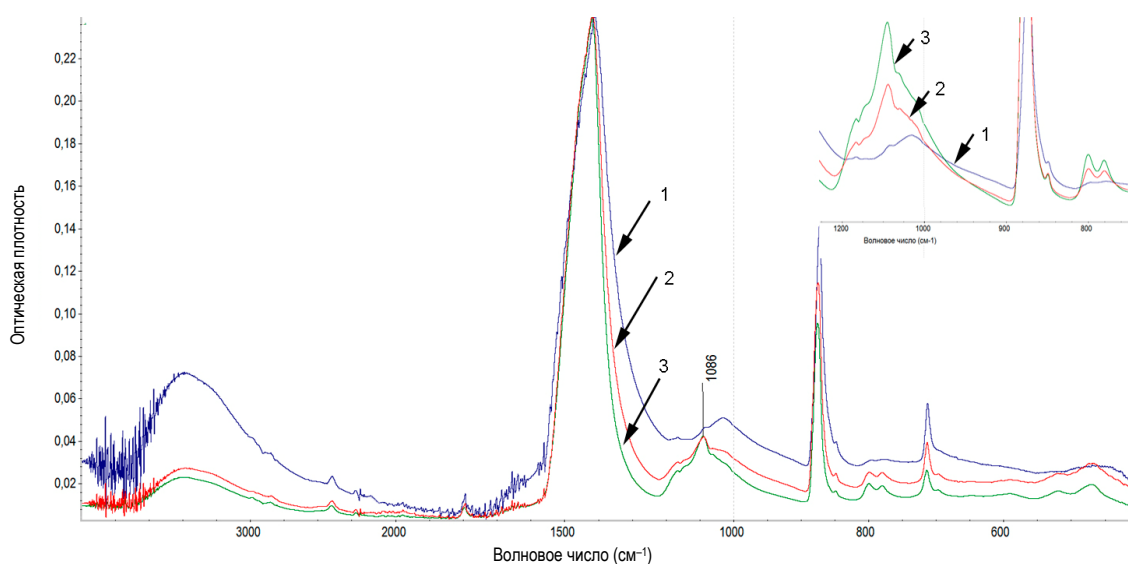


Рис. 2. ИК-спектр образцов кальцитовых неорганических отходов ТЭЦ «Южная» до (1) и после механической активации длительностью 5 мин (2) и 20 мин (3) в диапазоне полос $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$

Fig. 2. IR-spectrum of calcite inorganic waste specimens at Yuzhnaya thermal power plant prior to (1) and after mechanical activation with duration of 5 min (2) and 20 min (3) within the band range of $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$

Увеличение длительности механической активации до 20 мин приводит к смещению полосы поглощения Si–O–Si в область 1100 см^{-1} , при этом ширина пика сужается, а интенсивность увеличивается. Возрастает и интенсивность полос $778\text{ и }795\text{ см}^{-1}$, что связано с увеличением количества каркасных структур. Можно предположить, что механическая активация способствует как гомогенизации состава смеси, так и формированию каркасных структур. Согласно традиционным представлениям, реакционная способность силикатов снижается при переходе от островных структур к каркасным. Данный факт объясняется различным содержанием в них немостиковых связей, что особенно имеет значение для получения известково-кремнеземистых связующих. Скорее всего, увеличение немостиковых связей в кварц-кальцитной системе в условиях интенсивных ударно-сдвиговых воздействий возможно только после обработки длительностью более 20 мин. В то же время можно ожидать, что механическая активация кальцитовых отходов

будет способствовать повышению реакционной способности кальцита и увеличению интервала спекания, а активация кварца – связыванию воды.

Модифицирование керамического кирпича кальцитовыми неорганическими отходами

По данным рентгенофазового анализа, минералогический состав глины месторождения «Заполье» по массе представлен глинистыми минералами подкласса слоистых силикатов: галлуазитом $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ из группы каолинита – 15 % и монтмориллонитом $(\text{Na,Ca})_{0,33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ – 15 %, свободным кварцем SiO_2 – 33 %, кальцитом CaCO_3 – 9 %, гидрослюдами иллита $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ и мусковита $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ – 11 %, полевым шпатом – микроклином $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ – 8 %, гидроксидом алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 5 %, гематитом Fe_2O_3 – 3 % (рис. 3).

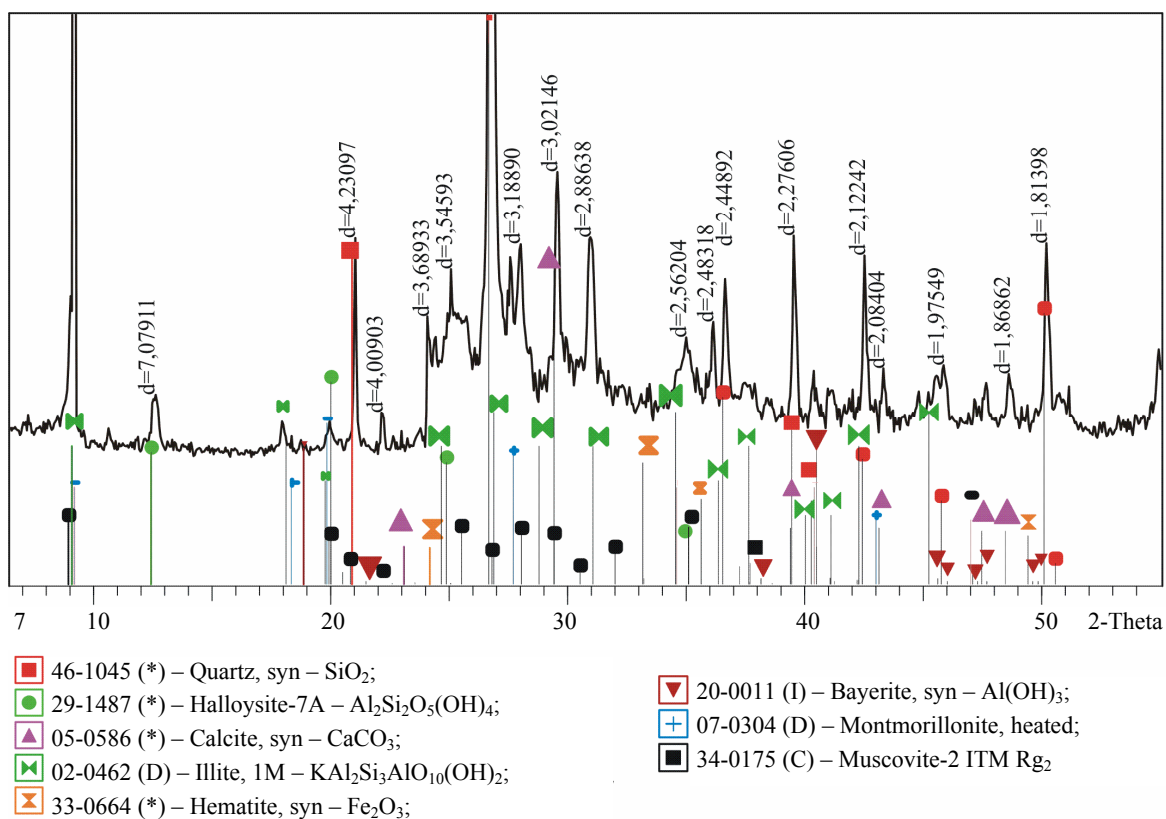


Рис. 3. Дифрактограмма глинистого сырья месторождения «Заполье»

Fig. 3. Diffractogram of clay raw material at Zapolye deposit

По численному соотношению оксидов алюминия и кремния $Al_2O_3:SiO_2$ алюмосиликатные осадочные породы условно разделяют на группы с высоким и низким отношением [10]. В алюмосиликатах структурной единицей является тетраэдр SiO_4 , а алюминий находится в SiO_4 в тетраэдрической или в октаэдрической координации. Отличительная особенность минералов – полоса поглощения 1438 см^{-1} , которая соответствует деформационным колебаниям ОН-групп в вершинах кремнекислородных тетраэдров. Для группы с высоким соотношением $Al_2O_3:SiO_2$ характерно появление нескольких полос поглощения в области $1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$. Так, полосы поглощения 1009 и 1032 см^{-1} обусловлены валентными колебаниями мостиковых связей $Si-O-Si(Al)$ в кристаллической структуре каолинита [11] (рис. 4). Это согласуется с его слоистым строением, в котором анион можно описать структурой Q^3 . Увеличение содержания алюминия будет способствовать снижению частоты колебаний мостиковых связей и смещению последней полосы в сторону 1043 см^{-1} .

Наличие каркасных групп $Si-O-Si(Q^4)$ кристаллического кварца в образцах первой группы идентифицируют по полосе поглощения в области $1085\text{--}1105\text{ см}^{-1}$, однако в данном случае форма полос значительно уширена. Полоса в интервале $900\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ связана с валент-

ными колебаниями, возникающими в немостиковых связях $Si-O$, происходящих в алюмосиликатных и силикатных группировках. А появление плеч 880 и 915 см^{-1} связано с деформационными колебаниями немостиковой связи $Al-OH$. Полосы поглощения в диапазоне от 469 до 800 см^{-1} можно отнести к связям группы $Si-O-Si(Al)$. Так, 469 и 695 см^{-1} относят к деформационным колебаниям группы с мостиковым кислородом $Si-O-Si$, а 533 и 778 см^{-1} – к колебаниям $Si-O-Al$ в структуре слюды и гидрослюды [10]. Полосы 3619 , 3650 , 3669 и 3693 см^{-1} относят к валентным колебаниям внутренних поверхностных ОН-групп. Присутствие на спектре всех вышеперечисленных полос поглощения характерно для образцов группы с высоким отношением $Al_2O_3:SiO_2$ (рис. 4b). В алюмокислородных октаэдрах каолинита деформационные колебания ОН-групп имеют полосы поглощения 940 и 913 см^{-1} . На гидроксильных ОН-группах возможна адсорбция воды, происходящая по механизму образования водородных связей, а также других кислородсодержащих соединений [11].

Для изготовления керамического кирпича в глинистое сырье в качестве отошающей добавки вводили кальцитовые неорганические добавки ТЭЦ «Южная». Изменение оксидного состава спеченного кирпича представлено в табл. 2.

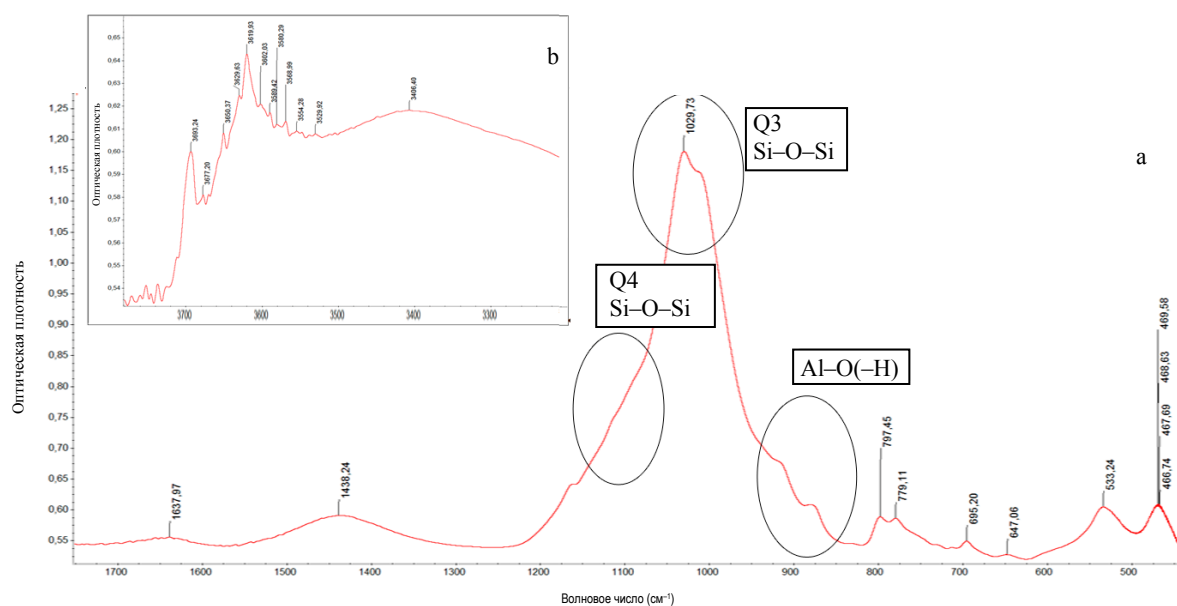


Рис. 4. ИК-спектр глинистого сырья месторождения «Заполье»: а – в длинноволновом и б – коротковолновом диапазонах

Fig. 4. IR-spectrum of clay raw material at Zapolie deposit: a – within long-wavelength and b – short-wavelength ranges

Оксидный состав спеченного кирпича
Brick oxide composition

Образец кирпича	Содержание оксидов, мас. %							
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO
Standard	1,4684	2,2646	14,3833	47,7641	7,3134	12,6099	1,6292	12,5671
15 % добавки	1,6140	2,3260	12,6477	39,3959	6,5573	20,8187	1,4446	15,1958

Из данных табл. 2 видно, что оксидный состав кирпича, спеченного из модифицированной глины, характеризуется пониженным содержанием SiO₂ (~39,4 %), а также Al₂O₃ (~12,6 %), одновременно в нем наблюдается повышенное содержание Fe (~15,2 %), которое играет роль плавня в процессе образования стекловидного расплава.

На рис. 5 и в табл. 3 приведены данные рентгеноструктурного анализа образцов полученного кирпича стандартного состава и с добавками отходов от 5 до 15 мас. %, а также данные их полуквантитативного минералогического состава.

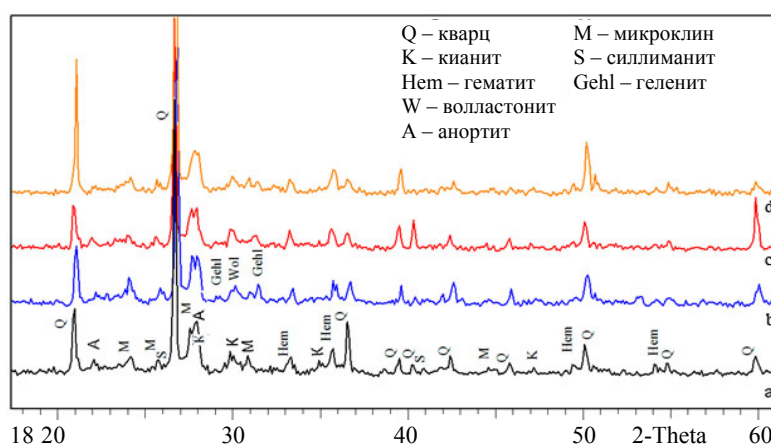


Рис. 5. Диффрактограммы минерального состава полученного кирпича следующего состава: а – стандартного; с добавкой, мас. %: б – 5; с – 10; д – 15

Fig. 5. Diffractograms of mineral composition for obtained brick: а – standard; with additive, wt. %: б – 5; с – 10; д – 15

Минералогический состав по данным полуквантитативного анализа
Mineralogical composition according to semi-quantitative analysis

Минерал		Содержание минерала, мас. %			
Название	Химическая формула	Standard	5	10	15
Кианит	Al ₂ O(SiO ₄)	8	13	14	12
Волластонит	Ca ₃ (Si ₃ O ₉)	3	3	3	3
Геленит	Ca ₂ Al(SiAl)O ₇	–	5	4	4
Микроклин	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	18	19	17	18
Анортит	Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈]	32	25	27	26
Кварц	Кварц (тригональный α-SiO ₂)	22	27	25	27
Гематит	α-Fe ₂ O ₃	2,8	3,3	3,5	3,4
Силлиманит	(Al ₂ O ₃)(SiO ₂)	4	5	7	7

Как видно из табл. 3, все образцы в значительном количестве содержат свободный кварц SiO_2 , микроклин, анортит. Количество рентгенографически определяемого гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ невелико – от 2,8 до 3,5 %. При введении водных отходов появляется дополнительный минерал геленит. Больше число добавок способствует увеличению содержания твердых минералов кианита и силлиманита.

По данным рентгенофазового анализа, количество исходного кварца в смесях стандартного состава, содержащих 5, 10, 15 % отходов, составляло 33, 34, 35 и 36 % соответственно. Процесс изменений фазового состава происходит с уменьшением свободного кварца с 33–36 % в исходном сырье до 22–27 % после спекания (табл. 3), что свидетельствует о доминировании жидкофазного механизма спекания. В этом случае содержание свободного кварца при спекании кирпича стандартного состава уменьшается в 1,5 раза, а при добавлении отходов химводоподготовки с содержанием кварца 16 % в количестве 5–15 % – в 1,3 раза. Как известно, в оксидах SiO_2 основными фазовыми превращениями являются полиморфные переходы α – β -кварца при температуре 575 °С. В силикатах эти превращения начинают происходить в интервале температур от 500 до 550 °С в результате энергоемкого процесса с потерей кристаллизационной воды, при этом каолинит трансформируется в метакаолинит, который является промежуточной стадией при переходе к высокотемпературным кристаллическим решеткам. Оксид алюминия Al_2O_3 в исследованном температурном интервале преобразовывается в результате твердофазной реакции в анортит и в виде отдельной фазы в спеченном продукте не регистрируется. В глине в интервале температур (900–95) °С наблюдается переход железистых соединений в гематит Fe_2O_3 с выраженным экзотермическим эффектом, что способствует локальному разогреву керамики и, как следствие, активации процессов спекания.

Кальцит при температуре (900 ± 10) °С подвергается разложению с образованием оксида кальция CaO и CO_2 , а соединения железа и его оксиды, предположительно, растворяются в стеклофазе [12]. Этот процесс является эндотермиче-

ским и по температуре совпадает с процессом дегидратации каолинита [13]. Согласно диаграмме фазовых состояний системы CaO-SiO_2 [14], в интервале температур (800–930) °С образуются соединения метасиликата кальция (CaSiO_3), трехкальциевый силикат ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$) и ортосиликат (Ca_2SiO_4) кальция. В [15] показано, что процесс кристаллизации анортита в глинистой массе с повышенным содержанием кальцита начинается при температуре 840 °С с выраженным экзотермическим эффектом. Процессы диссоциации CaCO_3 и дегидратации каолинита являются эндотермическими и проходят с учетом энергии, выделяемой при кристаллизации анортита. Вследствие этого оптимальный режим температурной обработки должен ускорить фазовые превращения с увеличением количества формируемого анортита, что будет способствовать повышению прочности керамики [13].

Микроструктура образцов кирпича (стандартного состава и с добавлением отходов химводоподготовки) по данным проведенной оптической микроскопии представляет собой наличие относительно крупных плотных включений (рис. 6) в мелкозернистой спеченной основной массе кирпича. Анализ полученных изображений показывает, что добавление водных отходов в шихту способствует формированию более крупных включений с образованием хорошо ограниченных кристаллов (что особенно видно на рис. 6b, c), а также пор. Это может быть признаком снижения температуры плавления и появления расплава, что приводит к процессам кристаллизации минералов из расплава. Данному процессу способствует увеличение содержания карбоната кальция, при разложении которого происходит выделение газов, что увеличивает пористость. Повышение содержания кальцита способствует увеличению количества жидкой фазы и, возможно, содержанию стеклофазы $\text{R}_2\text{O} \cdot \text{R}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$.

Проведенные исследования кирпича на прочность показали (рис. 7), что добавление неорганических отходов в количестве до 10–15 мас. % способствует повышению прочностных свойств кирпича керамического рядового полнотелого одинарного КРО-300/15/СТБ 1160–99.

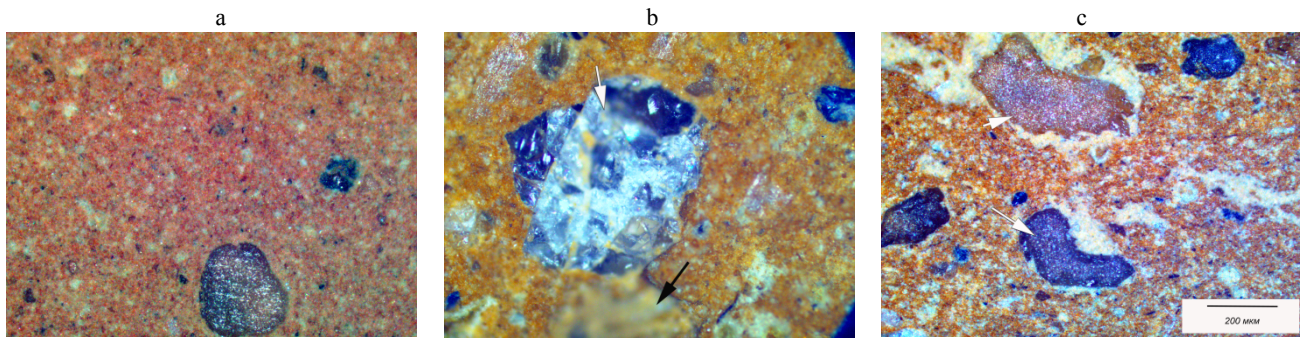


Рис. 6. Микроскопия в отраженном свете полученного кирпича следующего состава:
а – стандартного; с добавкой, мас. %: b – 5; с – 15

Fig. 6. Microscopy in reflected light of obtained brick having the following composition:
a – standard; with additive, wt. %: b – 5; c – 15

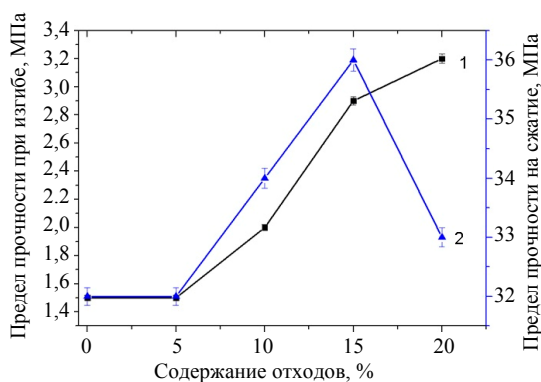


Рис. 7. Прочностные характеристики кирпича:
1 – предел прочности при изгибе;
2 – предел прочности на сжатие

Fig. 7. Strength characteristics of brick:
1 – bending strength; 2 – compressive strength

ВЫВОДЫ

1. Проведенные рентгенографические и инфракрасные спектральные исследования показали, что минералогический состав неорганических отходов ТЭЦ «Южная» ОАО «Витязь» (г. Витебск) представляет собой кальцитовую смесь с содержанием кальцита более 64 мас. %. Диоксид кремния находится в искаженных структурах, что может определяться примесями и адсорбционной водой (например, содержащими ОН-группы вместо кислорода). Интенсивная механическая активация кварц-кальцитных неорганических отходов приводит к измельчению кальцита и уменьшению количества адсорбированной воды, что способствует увеличению содержания каркасных структур диоксида кремния.

2. Сырье месторождения «Заполье», используемое в технологии производства керамического кирпича КРО-300/15, относится к группе алюмосиликатов с высоким отношением $Al_2O_3:SiO_2$, в которых немостиковые связи $Si-O(Q^3)$ преобладают над мостиковыми $Si-O-Si(Q^4)$ и обеспечивают его высокую реакционную способность.

3. Добавление отходов химводоподготовки ТЭЦ, содержащих карбонат кальция в количестве до 15 мас. %, при производстве изделий из глинистого сырья «Заполье» способствует снижению температуры обжига и появлению расплава, что приводит к процессам кристаллизации твердых минералов из расплава и увеличению количества стеклофазы, определяющей повышение прочностных свойств керамических изделий.

4. По функциональному назначению отходы химводоподготовки ТЭЦ могут быть рекомендованы в качестве отошающего сырья при производстве керамического полнотелого кирпича.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изготовление керамического кирпича с использованием промышленных отходов / А. П. Платонов [и др.] // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2015. Т. 28, № 1. С. 128–134.
2. Лазарева, Т. Л. Исследование влияния отходов промышленности на свойства стеновой керамики / Т. Л. Лазарева, Е. С. Куликова // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по материалам LV Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2016. Т. 50, № 2. С. 135–140.
3. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов / Д. В. Макаров [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 254–281.

4. Quality Improvement of Ceramic Bricks by Incorporation of Sludge from Water Treatment Units / Deborah Campos Cruz [et al.] // *The Journal of Engineering and Exact Sciences*. 2016. Vol. 2, No 2. P. 42–56. DOI: 10.18540/2446941602022016042.
5. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий / В. В. Болдырев [и др.]; под общ. ред. Е. Г. Аввакумова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 343 с.
6. Balzar, B. Voigt-Function Model in Diffraction Line-Broadening Analysis / B. Balzar // *Defect and Microstructure Analysis from Diffraction*. No 10. New York: Oxford University Press, 1999. P. 94–126.
7. Фермер, В.К. Инфракрасные спектры минералов / В. К. Фермер. Лондон: Минералогическое общество, 1974. 538 с.
8. Анфилов, В. Н. Силикатные расплавы / В. Н. Анфилов, В. Н. Быков, А. А. Осипов. М.: Наука, 2005. 357 с.
9. Плюснина, И. И. Инфракрасные спектры минералов / И. И. Плюснина. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1976. 190 с.
10. Лебедев, М. С. Особенности состава алюмосиликатного сырья с точки зрения его использования для получения дорожно-строительных материалов / М. С. Лебедев, И. Ю. Потапова, А. О. Лютенко // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2013. Т. 52, № 5. С. 70–74.
11. Аспекты применения инфракрасной спектроскопии алюмосиликатных сырьевых компонентов в строительном материаловедении / М. С. Лебедев [и др.] // *Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по материалам XXIV Междунар. науч.-практ. конф.* Новосибирск: СибАК, 2013. С. 445–449.
12. Левицкий, И. А. Структурообразование плотноспекшейся керамики бытового назначения / И. А. Левицкий, Ю. А. Климов // *Стекло и керамика*. 2005. № 6. С. 32–36.
13. Голованов, С. П. Отбеливание и интенсификация спекания керамики при использовании железосодержащих глин / С. П. Голованов, А. П. Зубехин, О. В. Лихота // *Стекло и керамика*. 2004. № 12. С. 9–11.
14. Павлов, В. Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики / В. Ф. Павлов. М.: Стройиздат, 1977. 240 с.
15. Высокотемпературные фазовые превращения в железосодержащих глинах / О. Н. Каныгина [и др.] // *Вестник ОГУ*. 2010. Т. 112, № 6. С. 113–118.
16. *Nauki – ot Teorii k Praktike: Sb. St. po Materialam LV Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Engineering Sciences – from Theory to Practice: Collected Papers of Proceedings of LVth International Scientific and Practical Conference]. Novosibirsk, SibAK Publ., 50 (2), 135–140 (in Russian).
17. Makarov D. V., Melkonyan R. G., Suvorova O. V., Kumárova V. A. (2016) Prospects for Use of Industrial Waste to Obtain Ceramic Building Materials. *Gorny Informatsionno-Analitichesky Byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*, (5), 254–281 (in Russian).
18. Cruz D. C., Oliveira J. S., Alvarenga M. C. S., Lavall R. L., de Oliveira C. R. (2016) Quality Improvement of Ceramic Bricks by Incorporation of Sludge from Water Treatment Units. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 2 (2), 42–56. <https://doi.org/10.18540/jcecv12iss2pp042-056>.
19. Boldyrev V. V., Avvakumov E. G. [et al.] (2009) *Fundamental of Mechanical Activation, Mechanochemistry and Mechanochemical Technologies*. Novosibirsk, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. 343 (in Russian).
20. Balzar B. (1999) Voigt-Function Model in Diffraction Line-Broadening Analysis. *Defect and Microstructure Analysis from Diffraction*. New York, Oxford University Press, 94–126.
21. Farmer V. C. (1974) *Infrared Spectra of Minerals*. London, Mineralogical Society. 538. <https://doi.org/10.1180/mono-4>.
22. Anfilov V. N., Bykov V. N., Osipov A. A. (2005) *Silicate Melts*. Moscow, Nauka Publ. 357 (in Russian).
23. Plyusnina I. I. (1976) *Infrared Spectra of Minerals*. Moscow, Moscow State University. 190 (in Russian).
24. Lebedev M. S., Potapova I. Yu., Lyutenko A. O. (2013) Specific Features in Aluminosilicate Raw Material Composition from the Point of View of its Use for Road-Building Materials. *Aktualnye Problemy Gumanitarnykh i Estestvennykh Nauk* [Actual Problems of Humanities and Natural Sciences], 52 (5), 70–74 (in Russian).
25. Lebedev M. S., Zhernovskii I. V., Fomina E. V., Potapova I. Yu. (2013) Aspects for Application of Infrared Spectroscopy of Aluminosilicate Raw Materials in Building Materials Science. *Tekhnicheskie Nauki – ot Teorii k Praktike: sb. st. po Mater. XXIV Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Engineering Sciences – From Theory to Practice: Collected Papers of Proceedings of XXIVth International Scientific and Practical Conference]. Novosibirsk, SibAK Publ., 445–449 (in Russian).
26. Levitskii I. A., Klimov Yu. A. (2005) Structuring of Densely Sintered Ceramic for Domestic Use. *Steklo i Keramika = Glass and Ceramics*, (6), 32–36 (in Russian).
27. Golovanov S. P., Zubekhin A. P., Likhota O. V. (2004) Bleaching and Intensification of Sintering of Ceramics Based on Iron-Bearing Clays. *Steklo i Keramika = Glass and Ceramics*, (12), 9–11 (in Russian).
28. Pavlov V. F. (1977) *Physicochemical Principles of Firing Construction Ceramics*. Moscow, Stroyizdat Publ. 240 (in Russian).
29. Kanygina O. N., Chetverikova A. G., Lazarev D. A., Sal'nikova E. V. (2010) High-Temperature of Phase Transformations in Iron Clays. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Vestnik of Orenburg State University*, 112 (6), 113–118 (in Russian).

Поступила 12.06.2019

Подписана в печать 03.09.2019

Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. Platonov A. P., Grechanikov A. V., Kovchur A. S., Kovchur S. G., Manak P. I. (2015) Manufacturing of Ceramic Bricks While Using Industrial Waste. *Vestnik Vitebskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 28 (1), 128–134 (in Russian).
2. Lazareva T. L., Kulikova E. S. (2016) Industry Waste Effect on Wall Ceramics Properties. *Tekhnicheskie*

Received: 12.06.2019

Accepted: 03.09.2019

Published online: 29.05.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-215-223>

УДК 624.26:666.97

Теоретические аспекты, экспериментальные исследования и эффективность армирования бетона органическими волокнами

Докт. техн. наук, проф. Г. Д. Ляхевич¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. А. Гречухин¹⁾,
канд. экон. наук, доц. А. Г. Ляхевич¹⁾, магистр техн. наук С. Ю. Рожанцев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Фибробетоны – это композиционные материалы, армированные волокнами-фибрами. Строительство сооружений из бетона, армированного органическими волокнами, имеет большую историю. Аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований показал, что использование фибробетона в мостовых и тоннельных конструкциях существенно улучшает их физико-механические показатели и, прежде всего, долговечность. Трехмерное упрочнение фибробетона принципиально изменяет свойства цементного камня, обеспечивая высокую трещиностойкость конструкций, повышая их сопротивление ударным и динамическим нагрузкам. Изменение соотношения объема различных волокон в бетоне позволяет регулировать свойства материала. Повышаются его предел прочности на растяжение при изгибе, коррозионная, атмосферно- и стойкость к переменному увлажнению-высушиванию, замораживанию-оттаиванию, улучшаются другие показатели. В статье представлены разработанные технология и составы фибробетона, дано описание изготовленных и испытанных опытных образцов безнапорных труб, армированных полипропиленовыми волокнами. Выполненные исследования показали, что полипропиленовые волокна снижают вероятность появления трещин и препятствуют их увеличению, а на этапе эксплуатации замедляют темпы роста трещин и концентрацию напряжений в области макродефектов. Благодаря введению фибры происходит перераспределение напряжений, возникающих в процессе структурообразования, от мест их концентрации на весь объем бетона. Фибра повышает сопротивление бетона сжатию, а также его долговечность при пониженных температурах и агрессивном воздействии реагентов. Полипропиленовое фиброволокно целесообразно применять для дисперсного армирования конструкций, работающих на изгиб, например тоннельных обделок, мостовых конструкций, бетонных безнапорных труб и др.

Ключевые слова: фибробетон, бетон-матрица, полипропиленовые волокна, составы, смеси, физико-механические свойства, опытные образцы безнапорных труб, эффективность использования

Для цитирования: Теоретические аспекты, экспериментальные исследования и эффективность армирования бетона органическими волокнами / Г. Д. Ляхевич [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 215–223. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-215-223>

Theoretical Aspects, Experimental Investigations and Efficiency in Concrete Reinforcement by Organic Fibres

G. D. Lyakhevich¹⁾, V. A. Grechukhin¹⁾, A. G. Lyakhevich¹⁾, S. Yu. Rozhantsev¹⁾

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

Abstract. Fibre concrete is a composite material reinforced by fibres. Construction of facilities while using concrete reinforced by organic fibres has rather long history. An analytical review of national and international investigations have shown that application of fibre concrete for bridge and tunnel structures significantly improves their physical and mechanical indices and, firstly, their service life. 3D strengthening of fibre concrete fundamentally changes properties of cement stone while

Адрес для переписки

Гречухин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 268-63-03
vag_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Grechukhin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 268-63-03
vag_ftk@bntu.by

ensuring high crack resistance of structures, increasing their resistance to impact and dynamic loads. Changes in volume ratio of various fibres in concrete make it possible to regulate material properties. It permits to increase its tensile strength, corrosion resistance, weather resistance and resistance to periodical moistening-drying and freezing-defrosting processes, and other indices are improved as well. The paper presents the developed technologies and fibre concrete compositions and contains description of manufactured and tested experimental specimens of non-pressure pipes reinforced by polypropylene fibres. The executed investigations have shown that the polypropylene fibres reduce probability of crack initiation and prevent their enlargement and when they are operated they depress growth of cracks and concentration of stresses in the field of macro-defects. Due to introduction of the fibre re-distribution of stresses caused by the process of structure formation has occurred from places of their concentration for the whole concrete volume. The fibre increases concrete resistance to compression and also improves service life of concrete at low temperatures and aggressive reagent action. The polypropylene fibres is expediently to apply for disperse reinforcement of structures working in bending, for example, being used for tunnel liner, bridge structures, concrete non-pressure pipes etc.

Keywords: fibre concrete, concrete matrix, polypropylene fibres, compositions, mixes, physical and mechanical properties, experimental specimens of non-pressure pipes, application efficiency

For citation: Lyakhevich G. D., Grechukhin V. A., Lyakhevich A. G., Rozhantsev S. Yu. (2020) Theoretical Aspects, Experimental Investigations and Efficiency in Concrete Reinforcement by Organic Fibres. *Science and Technique*. 19 (3), 215–223. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-215-223> (in Russian)

Введение.

Теоретические аспекты армирования бетона органическими волокнами

Армирование бетона органическими волокнами имеет большую историю. Шерсть овец, играющую роль армирующих волокон, обнаружили в блоках египетских пирамид. Со временем широко распространились полимеры: пропиленовые волокна (ППВ), полиэстеровые, полиамидные, полиолефиновые и др. ППВ получают из расплавленных полимеров или сополимеров пропилен [1] в результате штампования и вытягивания в ровные листы или волокна, которые расщепляются на мелкие волокнистые элементы. Получаемые фибриллированные волокна имеют прямоугольное или круглое поперечное сечение. Их разрезают на части различной длины – моно- и мультифиламентные волокна.

Для снижения трещинообразования при пластической усадке, увеличения сопротивления удару, устойчивости к истиранию и морозостойкости, обеспечения повышенной долговечности бетона в смесь добавляли органические волокна [2, 3]. Т. Экобори указывает [4], что количество, тип и длина волокон зависят от требований проекта, А. А. Смоликов [5] выдвигает теорию об использовании активных армирующих наполнителей, позволяющих улучшить свойства композиционных бетонов.

Ф. М. Рабинович [6] в 1980-е гг. изучал дисперсно-армированные бетоны, вводя в бетон-матрицу армирующие добавки. Авторы [7] внесли армирующие добавки в бетоны и изучали их физико-химические свойства. В. Л. Козина вводила в бетон низкомолекулярные полимерные волокна для повышения ударопрочности и трещиностойкости конструкций [8]. Группа уче-

ных [9] в начале 1980-х гг. рассматривала цементные композиции с низкомолекулярными волокнами в качестве гидроизоляционных материалов в тоннелестроении. Д. Купер и М. Пигготт [10] проводили исследования по растрескиванию и разрушению композитов. Авторы [11] изучали вопросы применения композитных материалов для чеканки швов отделки тоннелей.

Ф. Н. Рабинович [12] рассматривает методы расчета эффективных строительных конструкций на основе бетона, дисперсно-армированного различными модификациями высокопрочных волокон. Такие конструкции высокоэффективны в первую очередь в сложных, статически неопределимых системах со значительными градиентами внутренних усилий и знакопеременными напряжениями. При торкрет-бетонировании смесь, модифицированная полипропиленовым волокном, имеет лучшее сцепление с поверхностью, пониженный отскок ускоряет процесс набора прочности. Р. А. Грибов [13] моделировал работу армированных бетонных конструкций с учетом воздействия радиационных сред. Прогнозирование прочности и долговечности конструкций, длительно работающих в радиационной среде, важно для нормальной безаварийной эксплуатации ответственных сооружений. Рассмотрена модель деформирования прямоугольной дисперсно-армированной пластины с учетом воздействия радиационной среды. Упрочнение цементных систем волокнами основывается на предположении, что цементная матрица передает волокнам нагрузку посредством касательных сил, действующих по поверхности раздела [14]. Полипропиленовые волокна можно использовать для предотвращения образования пластических усадочных трещин.

При высокой дозировке длинных фибриллированных волокон торкрет-бетон по прочности соответствует бетону, содержащему 25–30 кг стальной арматуры. Бетон, имеющий прочность 60–100 МПа и более, применяют при строительстве объектов в Европе. Однако при температуре выше 200 °С для него характерно взрывное откалывание, что может угрожать жизни людей. Введение полипропиленовых новых волокон в бетонную смесь, имеющих температуру плавления (160–170) °С, снимает эту проблему, так как в бетоне образуются капилляры, через которые выходит перегретый пар. В настоящее время ППВ вводятся в бетон при возведении тоннелей и в других областях строительства [15]. В Беларуси применение фибробетона регламентируется СТБ EN 14889-1-2009 и СТБ EN 14889-2-2009 «Фибры для бетона». Фибробетон должен отвечать требованиям ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия» и ГОСТ 25192–2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования». В международных нормах существуют основные стандарты для армированного бетона [16–18].

Таким образом, применение дисперсного армирования позволяет снижать концентрацию напряжений, предотвращать развитие встречающихся трещин и затруднять процесс трещинообразования. Выбирая различные типы волокон и соотношение объема этих волокон друг к другу и бетону, можно направленно регулировать свойства материала и повышать его трещиностойкость. В свою очередь, это обеспечивает качественное улучшение не только стойкости материала под нагрузкой, но и повышает коррозионную стойкость, а также атмосферостойкость, стойкость к переменному увлажнению-высушиванию, замораживанию-оттаиванию и другим процессам.

В этой связи авторами поставлена цель: разработать технологию, составы фибробетона, изготовить и испытать опытные образцы безнапорных труб, армированных полипропиленовыми волокнами.

Экспериментальная часть.

Используемые материалы и технология изготовления образцов бетона

Для приготовления высокопрочного бетона водоцементное соотношение назначают менее 0,4, поэтому водоцементное отношение в исследовании составило от 0,27 до 0,36. Гранулометрический состав заполнителя принят в соответствии со стандартами Республики Беларусь. Для приготовления образцов использовали:

- цемент марки М500 ОДО «Вибробетон» ПЦ-Д0;
- кварцевый песок для строительных работ, ГОСТ 8736 [19];
- щебень с максимальной крупностью фракции до 20 мм, ГОСТ 8267 [20];
- суперпластификатор «Полипласт СП-1» – смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфоокислот различной молекулярной массы по ТУ 5870-005-58042865–05 [21, 22];
- водопроводную воду – для затворения бетонных смесей, которая отвечала требованиям СТБ 1114 [23];
- полипропиленовые фибры RS-20/8 (ТУ 2272-006-1349727–2007), диаметр фибр – 20 мкм, длина – 8, 12 и 20 мм.

В соответствии с инструкцией стандарта ASTM C192 [18], для приготовления образцов первоначально в бетономешалку подавались щебень и 1/5 часть воды. При вращении мешалки вводили фибру, песок. Массу перемешивали. А затем в бетономешалку добавляли цемент, суперпластификатор и остаток воды. Смесь перемешивалась в течение 3 мин, затем оборудование выключалось. После 3 мин ожидания перемешивание осуществлялось в течение 2 мин. Приготовленной смесью заполняли формы и уплотняли. Образцы выдерживали в течение 24 ч во влажной среде. Для набора проектной прочности бетона опытные образцы хранили в течение 28 сут. в воде. Исследования проводили в несколько этапов. При этом использовали различные составы с содержанием, кг/м³: цемента – 500–565; крупного заполнителя – 934–1155; мелкого заполнителя – 582–824; суперпластификатора – 6–20; полипропиленовой фибры – 0–2,7 и воды – 150–165 л. Испытания образцов бетона проводили в соответствии с ТКП 45-1.01-221–2010.

Исследование влияния количества полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на прочность на сжатие

Бетонные образцы без полипропиленовой фибры и образцы, армированные полипропиленовыми фибрами, после испытания на сжатие представлены на рис. 1, 2.

Исследования показали, что увеличение содержания полипропиленовых фибр в бетоне уменьшает потерю сопротивления его при сжатии. Оптимальное содержание полипропиленовых волокон в бетоне составляет 0,6–1,3 кг/м³, при этом его предел прочности на сжатие 82,3–85,7 МПа.



Рис. 1. Образец бетона без полипропиленовой фибры после испытания на сжатие

Fig. 1. Specimen of concrete without polypropylene fibre after compression test



Рис. 2. Образец бетона, армированный полипропиленовыми фибрами, после испытания на сжатие

Fig. 2. Specimen of concrete reinforced by polypropylene fibres after compression test

Исследование влияния размера полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на предел прочность на сжатие

Для изготовления образцов-кубиков с размером ребра 150 мм использовали 12 составов бетонных смесей, содержащих полипропиленовые фибры длиной 8, 12 и 20 мм с дозировкой 0,6; 1,3; 2,0 и 2,7 кг/м³. Образцы каждого состава испытывали на сжатие в возрасте 7 и 28 сут.

Результаты испытаний показали, что в образцах бетона с ППВ любой длины (в исследуемых пределах 8, 12 и 20 мм) волокна создают связующую сетку над трещинами (рис. 3).

Оптимальная длина полипропиленовых волокон 12 мм. При этой длине предел прочности на сжатие образцов бетона составил наибольшее значение – 84–86 МПа. Увеличение длины ППВ до 20 мм приводило к небольшому снижению предела прочности на сжатие образцов, армированных такими волокнами.



Рис. 3. Расположение волокон в бетоне при создании связующей сетки над трещинами

Fig. 3. Arrangement of fibres in concrete while creating adhesive mesh over cracks

Образцы бетона без ППВ после нагружения полностью разрушились (рис. 4), тогда как образцы, модифицированные полипропиленовыми волокнами с оптимальной длиной 12 мм, сохранили свою геометрию после испытаний (рис. 5). При этом в бетоне с волокнами на месте разрушения появились трещины вдоль направления нагрузки.



Рис. 4. Образцы бетона без полипропиленовых фибр после испытания на сжатие

Fig. 4. Specimens of concrete without polypropylene fibres after compression test



Рис. 5. Образец бетона, армированного полипропиленовой фиброй длиной 12 мм, после испытания на сжатие

Fig. 5. Specimen of concrete reinforced by polypropylene fibre having 12 mm length after compression test

Исследование влияния количества полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на его предел прочности на растяжение при изгибе

Полипропиленовое фиброволокно целесообразно применять для дисперсного армирования конструкций, работающих на изгиб, например тоннельных обделок, мостовых конструкций, бетонных безнапорных труб и др. Дисперсное армирование бетона полипропиленовой фиброй будет сдерживать процесс образования микротрещин в «опасных» сечениях стенки трубы и «залечивать» дефекты в структуре бетона. В результате возрастет прочность бетона на растяжение, а следовательно, повысится несущая способность труб.

Оптимальное объемное содержание фиброволокна определяли на пяти сериях бетонных призм размерами 15×15×600 см по четыре образца в каждой серии. Серии различались массовым содержанием полипропиленовой фибры (0; 0,6; 1,2; 1,8 и 2,4 кг/м³ в бетонной смеси),

применяемой при изготовлении железобетонных безнапорных труб. Состав смеси: портландцемент М500 – 420 кг; суперпластификатор – 6 кг; щебень фракции 5–20 – 1130 кг; кварцевый песок с Мк = 1,3 – 750 кг; вода – 150 л. Фиброволокно вводили при перемешивании мелкого и крупного заполнителя, время перемешивания составляло около 3 мин. Выдерживание и уход за уложенной фибробетонной смесью осуществляли согласно требованиям СП 70.13330 (СНиП 3.03-01-87). Для твердения уложенной фибробетонной смеси и роста прочности оптимальными являются относительная влажность 90–100 % и температура (18–25) °С. В возрасте 28 сут. бетонные призмы, армированные полипропиленовыми волокнами, были испытаны на изгиб, а затем их половинки – на сжатие. Схема испытания представлена на рис. 6.

Для испытаний использовали гидравлический малогабаритный пресс ПГМ-1000МГ4 (рис. 7).

Пресс ПГМ-1000МГ4 работает в диапазоне нагрузок 5–1000 кН, имеет цену деления 0,01 кН и предел относительной погрешности ±1 %.

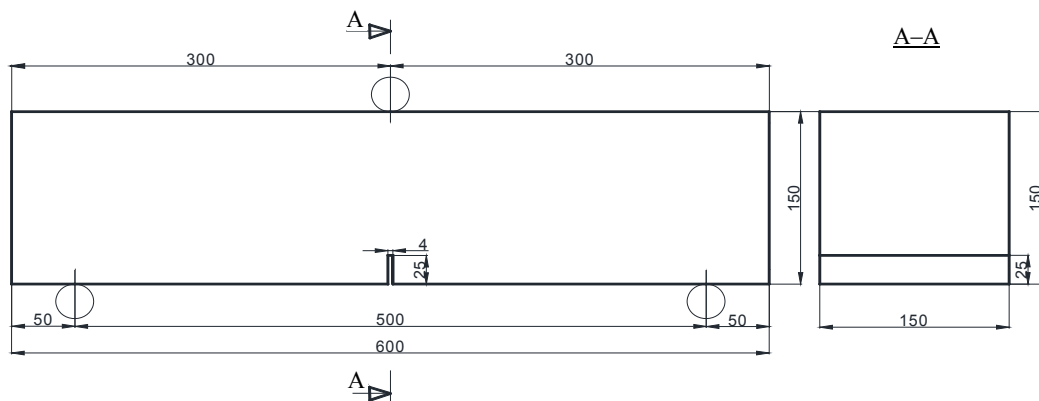


Рис. 6. Схема испытания образца на растяжение при изгибе

Fig. 6. Scheme for specimen bending-under-tension test



Рис. 7. Испытание бетонных призм размерами 15×15×60 см

Fig. 7. Test of concrete prisms having 15×15×60 cm size

Прочность дисперсно-армированных образцов на одноосное сжатие определяли на призмах. Отклонение от плоскостности опорных поверхностей призм не превышало $\pm 0,001$ наименьшего размера образца. Образцы готовили в соответствии с требованиями ГОСТ 10180. Сжимающая сила была приложена параллельно слоям укладки бетонной смеси в формы. Погрешность измерения линейных размеров образцов – не более 1 %, опорные грани, не удовлетворяющие требованиям, выравнивали шлифованием. Продолжительность испытания образцов одной серии в расчетном возрасте – не более 1 ч. Шкалу силоизмерителя выбирали из условия нахождения ожидаемого значения разрушающей нагрузки в интервале 20–80 % максимальной нагрузки. Загружение вели с постоянной скоростью, равной $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с.

Испытания показали, что применение полипропиленовой фибры с расходом $2,4 \text{ кг/м}^3$ обеспечило среднюю прочность бетона при осевом растяжении $4,17 \text{ МПа}$, что соответствует марке бетона на растяжение по СНиП II-21–75, из которого были запроектированы бетонные трубы по ГОСТ 20054, прочность бетона на сжатие составила $84,3 \text{ МПа}$. Следует отметить, что при расходе ППВ $1,2 \text{ кг/м}^3$ разрушение призм происходило «мягко» (без треска), в сравнении с характером разрушения контрольных призм без добавления полипропиленовых волокон.

Изготовление и испытание опытных образцов безнапорных труб, армированных полипропиленовыми волокнами

Несущую способность труб с дисперсным армированием бетона проверяли на двух образцах труб диаметром 800 мм. Образец 1 имел толщину стенки цилиндрической части 100 мм, а образец 2 – 80 мм.

Образец 1 изготовлен методом вибропрессования с расходом полипропиленовой фибры $1,8 \text{ кг/м}^3$. Бетонную смесь уплотняли вибрацией и вертикальным прессующим давлением. Бетонная смесь с полипропиленовым фиброволокном была более вязкой, в сравнении с бетонной смесью обычного состава.

Образец 2 изготовлен методом радиального прессования, основанного на уплотнении жестких бетонных смесей приложением радиальных прессующих усилий. Усилия прессования создаются вращающейся роликовой головкой, снабженной лопатками, прижимными роликами и цилиндрической «юбкой» (рис. 8). При формовке роликовую головку опускают в нижнее положение, после чего во внутреннюю полость формы подают бетонную смесь, включают приводные механизмы вращения и поднимают роликовую головку вверх со скоростью $1,0–1,5 \text{ м/мин}$. Уплотненная бетонная смесь остается спрессованной внутри формы.

Радиальное прессование эффективно при производстве фибробетонных труб, при вращении элементы роликовой головки равномерно распределяют фиброволокно по толщине бетона. Благодаря отсутствию арматурного каркаса (при изготовлении железобетонных труб существует проблема закручивания арматурного каркаса роликовой головкой) время формовки трубы сокращается, а качество уплотнения бетона повышается, исключаются затраты по изготовлению арматурных каркасов и увеличивается производительность технологической линии. Трубы испытывали на действие трехлинейной нагрузки, созданной с помощью гидравлического домкрата ДГ-80 и приложенной ступенями по 5 кН/м с выдержкой 10 мин на каждой ступени. Изменение горизонтального диаметра трубы измеряли прогибометром (рис. 9).

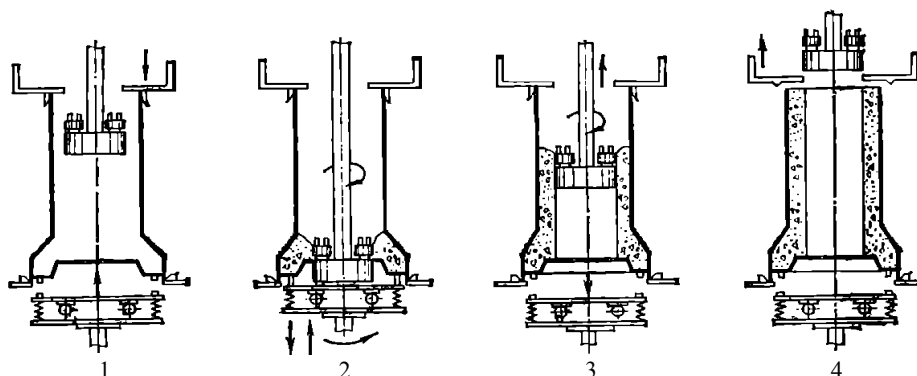


Рис. 8. Схема формовки трубы

Fig. 8. Scheme of pipe moulding



Рис. 9. Принципиальная схема установки
Fig. 9. Principal diagram of plant

Принципиальная схема установки для испытаний трубы представлена на рис. 9. Разрушение труб происходило хрупко, но не мгновенно (как без ППВ). При нагрузке $(0,90-0,95)P_{\text{раз}}$ наблюдалась ускоренная деформация кольцевого сечения, что свидетельствовало о развитии процесса микротрещинообразования в бетоне растянутых зон опасных сечений стенки трубы. Труба разломалась по четырем образующим (по вертикальному и горизонтальному диаметрам). При этом трещины появились на втулке и быстро распространились до конической части раструба. Далее происходило разветвление горизонтальных трещин (на две) с разделением трубы на фрагменты (рис. 10).



Рис. 10. Характер разрушения образца 2
Fig. 10. Nature of specimen 2 destruction

При нагрузке $0,9P_{\text{раз}}$ диаметр трубы изменился на 0,15 мм. Для бетонных труб фактическое сопротивление бетона осевому растяжению определено по разрушающей нагрузке через максимальный изгибающий момент M , возникающий в трубе, и предельный момент трещиностойкости продольного сечения стенки трубы [24]:

$$M = 0,318P_{\text{раз}}r_{\text{т}}, \quad (1)$$

где $r_{\text{т}}$ – радиус срединной поверхности трубы.

Таким образом, зная предельное значение контрольной нагрузки и используя (1), опреде-

лили среднюю прочность бетона трубы при осевом растяжении. Установлено, что прочность бетона на растяжение в трубе, изготовленной методом радиального прессования, обеспечивающего высокую плотность, на 18 % больше прочности бетона на растяжение в трубе, изготовленной методом вибропрессования.

Результаты исследований подтвердили высокую эффективность полипропиленовых волокон в качестве армирующей добавки в бетон. Использование полипропиленовых волокон уменьшает риск потери несущей способности бетона. Эти ППВ не только улучшают несущую способность высокопрочного бетона, но и увеличивают его гибкость. За счет высокого сопротивления волокна предотвращают появление трещин и сопротивляются их увеличению. Добавление ППВ уменьшает осадку конуса, повышает сопротивление бетона на сжатие; с увеличением их содержания в объеме бетона этот показатель возрастает. Например, в образцах, содержащих $2,7 \text{ кг/м}^3$ ППВ, сопротивление бетона на сжатие увеличилось на 20 %.

Кроме объема, важную роль играет длина волокон. При одинаковых их объемах увеличение длины с 8 до 12 мм повышает сопротивление, но при увеличении длины до 20 мм сопротивление уменьшилось. Это объясняется появлением пузырей в бетоне из-за пучков волокон, что ослабляет матрицу бетона и создает трещины.

Дисперсное армирование бетона с использованием ППВ и технологии радиального прессования обеспечивает высокое качество уплотнения и достижение средней прочности бетона при осевом растяжении не менее 4,8 МПа, что позволяет изготавливать безнапорные трубы диаметром до 1000 мм первой и второй групп по несущей способности.

Эффективность применения полипропиленовых волокон в бетонных смесях

Эффективность применения ППВ определяли по изменению физико-механических свойств бетонных смесей и бетонов. Результаты экспериментов подтвердили: полипропиленовые волокна оказывают на цементный камень армирующее и уплотняющее действие, что дает возможность уменьшить количество цемента. Тонкодисперсные и активные волокна, имею-

щие оптимальную дисперсность, диаметр и энергетическую плотность, способствуют получению плотной упаковки цементного теста.

Эффективность применения ППВ играет важную роль при подборе состава бетонной смеси и включает в себя характеристики армирующей способности и химической активности, определяющие показатели качества при модифицировании цементных бетонов.

ВЫВОДЫ

1. Фибробетоны – это композиционные материалы, создаваемые путем ввода в бетонную смесь волокон-фибр. Результаты исследований подтвердили высокую эффективность полипропиленовых волокон в качестве армирующей добавки в бетон. Они не только улучшают несущую способность высокопрочного бетона, но и увеличивают его гибкость, предотвращают появление трещин и сопротивляются их увеличению. Добавление фибр увеличивает сопротивление бетона при сжатии. Испытания на сжатие высокопрочных бетонов показали, что оптимальным является добавление полипропиленовых фибр с волокнами длиной 12 мм.

2. Используя разработанные составы бетонных смесей, содержащих полипропиленовые волокна, изготовлены и испытаны образцы труб диаметром 800 мм. Установлено, что прочность труб на растяжение, изготовленных методом радиального прессования, на 18 % больше прочности труб, изготовленных методом вибрирования.

3. Разработанные составы фибробетона с полипропиленовыми волокнами обеспечат его высокую плотность, снижение проницаемости и водопоглощения, повышенную морозо- и стойкость к химическим воздействиям, повышенное сопротивление удару и раскалыванию, сокращение расхода арматуры, высокую начальную прочность, повышение долговечности и увеличение межремонтного периода сооружений. С учетом высоких технических показателей и экономичности полипропиленовых фибр предлагается использовать их в бетонах мостовых и тоннельных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журнал «Строительные материалы» [Электронный ресурс] / Интернет-издание. Минск, 2014. Режим доступа: http://www.grad.sml.by/index.php?id-9&Itemid=5&option=com_content&task=view. Дата доступа: 15.11.2015.
2. Органические добавки в бетон [Электронный ресурс] / Экология на предприятии. Минск, 2015. Режим доступа: http://ecologia.by/number/2011/2/ispolzovanie_doba_vok_v_betone. Дата доступа: 15.11.2015.
3. Электронное издание «Строительство» [Электронный ресурс]. Минск, 2014. Режим доступа: <http://stroitel.by/by/polipropilenvolokna>. Дата доступа: 08.07.2015.
4. Экобори, Т. Научные основы прочности и разрушение материалов / Т. Экобори. Киев: Наук. думка, 2008. С. 78–99.
5. Смоликов, А. А. Бетон, армированный нановолокнами / А. А. Смоликов // Бетон и железобетон. 2009. № 4. С. 8–9.
6. Рабинович, Ф. М. Дисперсно-армированные бетоны / Ф. М. Рабинович. М.: Стройиздат, 1989. С. 117–147.
7. Рамчандран, В. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение / В. Рамчандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуен; пер. с англ. под ред. В. Б. Ратинова. М.: Стройиздат, 1986. С. 142–157.
8. Козина, В. Л. Повышение ударопрочности и трещиностойкости крупноразмерных изделий на основе гипсоцементнопуццоланового бетона путем введения низкомолекулярных полимерных волокон / В. Л. Козина. М., 1979. 157 с.
9. Гидроизоляционные цементные композиции с низкомолекулярными волокнами / В. В. Козлов [и др.] // Метрострой. 1983. № 6. С. 23.
10. Купер, Д. Растрескивание и разрушение композитов / Д. Купер, М. Пигготт // Механика разрушения. 1979. № 17. С. 165–216.
11. Козлов, В. В. Улучшение физико-механических свойств цементных составов для зачеканки швов обделки тоннелей / В. В. Козлов, О. Л. Фиговский, Р. М. Ахмеднабиев // Транспортное строительство. 1983. № 12. С. 18.
12. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович. М.: Изд-во «АСВ», 2004. 560 с.
13. Грибов, Р. А. Моделирование поведения фибробетонных конструкций в условиях радиационного облучения / Р. А. Грибов // Бетон и железобетон. 2008. № 3. С. 19–20.
14. Тимашов, В. В. К вопросу об армировании цементного камня / В. В. Тимашов, И. И. Сычева, Н. С. Никонова // Труды МХТИ имени Д. И. Менделеева. 1976. Вып. 2. С. 155–156.
15. Строительное издание Франции [Электронный ресурс] / Строительство сегодня. Леон, 2015. Режим доступа: <http://www.bildingtooday.html>. Дата доступа: 10.03.2015.
16. Fibres for Concrete. Steel Fibres. Definitions, Specifications and Conformity: BS EN 14889-1:2006. Publication date 29.09.2006. The European Committee for Standardization: BSI, 2006. 30 p.
17. Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete: ASTM C116 / C116-03. Publication Date 10.05.2008. ASTM International: West Conshohocken, 2008. 22 p.
18. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory: ASTM C192 / C192M-14. Publication date 01.01.2014. ASTM International: West Conshohocken, 2014. 25 p.

19. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736–2014. Введ. 01.04.2014. М.: Межгосуд. совет по стандарт., метрол. и сертиф., 2015. 12 с.
20. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8267–95. Введ. 07.01.1995. Минск: Минстройархитектуры, 1995. 15 с.
21. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия: ГОСТ 24211–2008. Введ. 29.04.2010. М.: Стандартиформ, 2010. 15 с.
22. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112–98. Введ. 04.10.1999. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 23 с.
23. Вода для бетонов и растворов. Технические условия: СТБ 1114–98. Введ. 01.01.1999. Минстройархитектуры, 1999. 11 с.
24. Шепелевич, Н. И. Об использовании показателей прочности бетона при осевом растяжении при проектировании бетонных труб / Н. И. Шепелевич // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. науч. тр. Ч. 1. Брест, 2009. С. 54–58.
- Поступила 04.04.2019
Подписана в печать 11.06.2019
Опубликована онлайн 29.05.2020
- REFERENCES
- Journal “Stroitelnye Materialy” [Construction Materials] [Electronic resource] / Web-Based Media. Minsk, 2014. Available at: http://www.grad.sml.by/index.php?id=9&Itemid=5&option=com_content&task=view. (Accessed 15 November 2015).
 - Organic Additives in Concrete [Electronic resource] / Ecology at Enterprise. Minsk, 2015. Available at: http://ecologia.by/number/2011/2/ispolzovanie_dobavok_v_betone. (Accessed 15 November 2015).
 - Electronic Publication “Construction” [Electronic resource]. Minsk, 2014. Available at: <http://stroitel.by/by/polipropilenvolokna> (Accessed 08 July 2015).
 - Ekobori T. (2008) *Scientific Fundamentals of the Strength and Failure of Materials*. Kiev, Navukova Dumka Publ., 78–99 (in Russian).
 - Smolikov A. A. (2009) Concrete Reinforced by Nanofibers. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (4), 8–9 (in Russian).
 - Rabinovich F. M. (1989) *Fiber Reinforced Concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ., 117–147 (in Russian).
 - Ramachandran V., Feldman R., Beaudoin J. (1981) *Concrete Science. Treatise on Current Research*. Heyden. London.
 - Kozina V. L. (1979) *Improvement of Impact and Crack Resistance of Large-Sized Products on the Basis of Gypsum-Cement-Puzzolan Concrete while Introducing Low-Module Polymer Fibers*. Moscow, 157 (in Russian).
 - Kozlov V. V., Kagan M. Z., Akhmednabiev P. M., Bogomolov G. M. (1983) Damp-Proof Cement Compositions with Low-Module Fibers. *Metrostroj* [Metrostroy], (6), 23 (in Russian).
 - Cooper G., Piggott M. (1978) Cracking and Fracture in Composites. *Advances in Research on the Strength and Fracture of Materials*, 557–605. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-022136-6.50042-1>.
 - Kozlov V. V., Figovskii O. L., Akhmednabiev R. M. (1983) Improvement of Physical and Mechanical Properties of Cement Compositions for Joint Packing During Tunnel Lining. *Transportnoye Stroitel'stvo* [Transport Construction], (12), 18 (in Russian).
 - Rabinovich F. N. (2004) *Composites on the Basis of Fiber-Reinforced Concrete. Issues of Theory and Design, Technology, Structures*. Moscow, ASV Publ. 560 (in Russian).
 - Gribov R. A. (2008) Simulation of Fiber-Concrete Structure Behavior under Conditions of Radiation Exposure. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (3), 19–20 (in Russian).
 - Timashov V. V., Sychiova I. I., Nikonova N. S. (1976) On the Problem about Cement Stone Reinforcing. *Trudy MKhTI imeni D. I. Mendeleeva* [Proceedings of Moscow D. Mendeleev Institute of Chemical Technology], (2), 155–156 (in Russian).
 - Construction Publication of France [Electronic resource] / Construction Today. Leon, 2015. Available at: <http://www.bildingtoday.html> (Accessed 10 March 2015).
 - BS EN 14889-1:2006. *Fibres for Concrete. Steel Fibres. Definitions, Specifications and Conformity*. The European Committee for Standardization: BSI, 2006. 30.
 - ASTM C116 / C116-03. *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete*. ASTM International: West Conshohocken, 2008. 22.
 - ASTM C192 / C192M-14. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International: West Conshohocken, 2014. 25.
 - State Standard 8736–2014. *Sand for Construction Works. Technical Specifications*. Moscow, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2015. 12 (in Russian).
 - State Standard 8267–95. *Broken Stone and Gravel Aggregate from Consolidated Mine Rock for Construction Works. Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1995. 15 (in Russian).
 - State Standard 24211–2008. *Additives for Concrete and Construction Mortars. General Technical Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 15 (in Russian).
 - STB [Standards of the Republic of Belarus] 1112–98. *Additives for Concrete. General Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 23 (in Russian).
 - STB [Standards of the Republic of Belarus] 1114–98. *Water for Concrete and Mortars. Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1999. 11 (in Russian).
 - Shepelevich N. I. (2009) About Use of Concrete Strength Indicators During Axial Tension while Designing Concrete Pipes. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov Respubliki Belarus': Sb. Nauch. Tr. Ch. 1* [Prospects for Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel in the Republic of Belarus: Collection of Research Papers. Part 1]. Brest, 54–58 (in Russian).

Received: 04.04.2019

Accepted: 11.06.2019

Published online: 29.05.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-224-229>

УДК 539.3

К решению контактной задачи для прямоугольной пластинки на упругом полупространстве

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

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. До настоящего времени отсутствует точное решение контактной задачи для прямоугольной пластинки на упругом основании с распределительными свойствами. Практическими аналогами такой конструкции являются широко применяемые в строительстве плитные фундаменты. Многие ученые решали эту задачу различными способами. Методы конечных разностей, Б. Н. Жемочкина и степенных рядов не выделяют особенность в контактных напряжениях у краев плиты. Автор статьи получил разложение решения Буссинеска для определения перемещений поверхности упругого полупространства в виде двойного ряда по полиномам Чебышева первого рода в прямоугольной области. Впервые такое представление для симметричной части решения Буссинеска получил В. И. Сеймов и применил это разложение для исследования симметричных колебаний прямоугольного штампа с учетом инерционных свойств полупространства. Используя данное разложение, автор приводит решение задачи о динамических перемещениях прямоугольной пластинки, лежащей на упругом полупространстве, под действием произвольно приложенной сосредоточенной силы. При этом искомые перемещения задавались в виде двойного ряда по полиномам Чебышева первого рода, контактные напряжения – в виде двойного ряда по полиномам Чебышева первого рода с весом. В интегральном уравнении контактной задачи выполняется интегрирование по прямоугольной области с учетом ортогональности полиномов Чебышева. В полученном выражении приравниваются коэффициенты при одинаковых произведениях полиномов Чебышева. Получается бесконечная система линейных алгебраических уравнений, которая решается методом усиления. Таким образом находятся искомые коэффициенты в разложении для контактных напряжений.

Ключевые слова: упругое полупространство, контактная задача, прямоугольная пластинка

Для цитирования: Босаков, С. В. К решению контактной задачи для прямоугольной пластинки на упругом полупространстве / С. В. Босаков // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 224–229. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-224-229>

To Solution of Contact Problem for Rectangular Plate on Elastic Half-Space

S. V. Bosakov¹⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Until the present time there is no exact solution to the contact problem for a rectangular plate on an elastic base with distribution properties. Practical analogues of this design are slab foundations widely used in construction. A lot of scientists have solved this problem in various ways. The methods of finite differences, B. N. Zhemochkin and power series do not distinguish a specific feature in contact stresses at the edges of the plate. The author of the paper has obtained an expansion of the Boussinesq solution for determining displacements of the elastic half-space surface in the form of a double series according to the Chebyshev polynomials of the first kind in a rectangular region. For the first time, such a representation for the symmetric part of the Boussinesq solution was obtained by V. I. Seimov and it has been applied to study symmetric vibrations of a rectangular stamp, taking into account inertial properties of the half-space. Using this expansion, the author gives a solution to the problem for a rectangular plate lying on an elastic half-space under the action of an arbitrarily applied concentrated force. In this case, the required displacements are specified in the form of a double row in the Chebyshev polynomials of the first kind. Contact stresses are also specified in the form of a double row according to the Chebyshev polynomials of the first kind with weight. In the integral equation of the contact problem integration over a rectangular region is performed while taking into account the orthogonality of the Chebyshev polynomials. In the resulting expression the coefficients are equal for the same products of the Chebyshev polynomials. The result is an infinite system of linear algebraic equations, which is solved by the amplification method. Thus the sought coefficients are found in the expansion for contact stresses.

Keywords: elastic half-space, contact problem, rectangular plate

For citation: Bosakov S. V. (2020) To Solution of Contact Problem for Rectangular Plate on Elastic Half-Space. *Science and Technique*. 19 (3), 224–229. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-224-229> (in Russian)

Адрес для переписки
Босаков Сергей Викторович
ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15б,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence
Bosakov Siarhei V.
UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b, F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-28
up-niptis@rambler.ru

Введение

До настоящего времени отсутствует точное решение контактной задачи для прямоугольной пластинки на упругом основании с распределительными свойствами. Практическими аналогами такой конструкции являются широко применяемые в строительстве плитные фундаменты. Решение этой задачи методом степенных рядов рассмотрено М. И. Горбуновым-Посадовым [1], методом конечных разностей – В. И. Соломиным [2], С. М. Алейниковым [3], способом Б. Н. Жемочкина – в [4, 5], методом Ритца – в [6]. Особое значение имеют работы по исследованию поведения контактных напряжений в угловых точках [7, 8]. Однако методы конечных разностей, Б. Н. Жемочкина и степенных рядов не выделяют особенность в контактных напряжениях у краев плиты. Впервые представление для симметричной части решения Буссинеска получил В. И. Сеймов [9] и использовал это разложение для исследования симметричных колебаний прямоугольного штампа с учетом инерционных свойств полупространства.

Разложение решения Буссинеска в ряд по полиномам Чебышева

Известно, что плоская деформация является частным случаем пространственной задачи, поэтому решение Фламана для упругой полуплоскости можно получить интегрированием решения Буссинеска для упругого полупространства. Также доказано, что формула перемещений границы упругой полуплоскости от действия сосредоточенной силы (решение Фламана) допускает билинейное разложение [8]

$$\ln|x - \xi| = -\ln 2 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{m} T_m(x) T_m(\xi), \quad |x, \xi| \leq 1. \quad (1)$$

Поэтому естественно предположить, что выражение для определения вертикальных перемещений поверхности упругого полупространства от действия сосредоточенной силы (решение Буссинеска) также допускает двойное билинейное представление в форме

ранства от действия сосредоточенной силы (решение Буссинеска) также допускает двойное билинейное представление в форме

$$\frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + \alpha^2(y - \eta)^2}} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{m,n}(\alpha) T_m(x) T_m(\xi) T_n(y) T_n(\eta), \quad (2)$$

$$|x, \xi| \leq 1; |y, \eta| \leq 1; 0 < \alpha \leq 1.$$

Коэффициенты разложения из (2):

$$C_{m,n}(\alpha) = \beta_{m,n} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{T_m(x) T_m(\xi) T_n(y) T_n(\eta)}{\sqrt{(x - \xi)^2 + \alpha^2(y - \eta)^2}} \times$$

$$\times \frac{dx d\xi dy d\eta}{\sqrt{1 - x^2} \sqrt{1 - \xi^2} \sqrt{1 - y^2} \sqrt{1 - \eta^2}}, \quad (3)$$

$$\beta_{0,0} = \frac{1}{\pi^4}; \beta_{m,0} = \beta_{0,n} = \frac{4}{\pi^4}; \beta_{m,n} = \frac{16}{\pi^4}.$$

Справедливость представления (2) можно доказать из условия симметричности ядра Буссинеска. Действительно, два функциональных ряда равны, если равны попарно одноименные члены этих рядов:

$$\frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + \alpha^2(y - \eta)^2}} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} C_{m,n}^{i,k}(\alpha) T_m(x) T_n(y) T_i(\xi) T_k(\eta);$$

$$\frac{1}{\sqrt{(\xi - x)^2 + \alpha^2(\eta - y)^2}} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} C_{m,n}^{i,k}(\alpha) T_m(\xi) T_n(\eta) T_i(x) T_k(y).$$

Это приводит к равенству, которое выполняется при условии $m = i$ и $n = k$:

$$T_m(x) T_i(\xi) T_n(y) T_k(\eta) = T_m(\xi) T_i(x) T_n(\eta) T_k(y).$$

Представим [9, 10]

$$\frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + \alpha^2(y - \eta)^2}} = \int_0^{\infty} J_0(\beta \sqrt{(x - \xi)^2 + \alpha^2(y - \eta)^2}) d\beta = \sum_{j=-\infty}^{\infty} J_j(\beta x) J_j(\beta \xi) \sum_{i=-\infty}^{\infty} J_i(\alpha \beta y) J_i(\alpha \beta \eta) +$$

$$+ 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \sum_{j=-\infty}^{\infty} J_{2k+j}(\beta x) J_j(\beta \xi) \sum_{i=-\infty}^{\infty} J_{2k+i}(\alpha \beta y) J_i(\alpha \beta \eta). \quad (4)$$

Подставим (4) в (3) и выполним интегрирование с учетом формул [10]

$$\int_0^1 \frac{J_\nu(xy) T_m(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx = \frac{\pi}{2} J_{\frac{\nu+m}{2}}\left(\frac{y}{2}\right) J_{\frac{\nu-m}{2}}\left(\frac{y}{2}\right). \quad (5)$$

Получим

$$\frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + \alpha^2(y-\eta)^2}} = \pi^4 \int_0^\infty \left[\sum_{j=-\infty}^\infty J_{\frac{j+m}{2}}^2\left(\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{j-m}{2}}^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \sum_{i=-\infty}^\infty J_{\frac{i+n}{2}}^2\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{i-n}{2}}^2\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) + 2 \sum_{k=1}^\infty (-1)^k \times \right. \\ \left. \times \sum_{j=-\infty}^\infty J_{k+\frac{j+m}{2}}\left(\frac{\beta}{2}\right) J_{k+\frac{j-m}{2}}\left(\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{j+m}{2}}\left(\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{j-m}{2}}\left(\frac{\beta}{2}\right) \sum_{i=-\infty}^\infty J_{k+\frac{i+n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{k+\frac{i-n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{i+n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{i-n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) \right] d\beta. \quad (6)$$

В (6) из интеграла (5) следует, что j и m , i и n являются одновременно четными либо нечетными. Рассмотрим сумму

$$\sum_{i=-\infty}^\infty J_{k+\frac{i+n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{k+\frac{i-n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{i+n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{i-n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right). \quad (7)$$

Выполним замены [10, 11]

$$J_{k+\frac{i+n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{k+\frac{i-n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) = \frac{2}{\pi} (-1)^{k-n+i} \int_0^{\pi/2} \cos(2k+i)\theta J_n(\alpha\beta \cos\theta) d\theta \times \\ \times J_{\frac{i+n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{\frac{i-n}{2}}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos n \varphi J_i(\alpha\beta \cos\varphi) d\varphi. \quad (8)$$

Найдем сумму ряда (7) при условии, что i и n являются одновременно четными. Последовательно находим:

$$\sum_{i=-\infty}^\infty (-1)^i \cos(2k+2i)\theta J_{2i}(\alpha\beta \cos\varphi) = \cos 2k\theta \sum_{i=-\infty}^\infty (-1)^i \cos 2i\theta J_{2i}(\alpha\beta \cos\varphi) = \\ = \cos 2k\theta \left[J_0(\alpha\beta \cos\theta) + 2 \sum_{i=1}^\infty (-1)^i \cos 2i\theta J_{2i}(\alpha\beta \cos\theta) \right] = \cos 2k\theta \cos(\alpha\beta \cos\theta \cos\varphi); \quad (9) \\ \int_0^{\pi/2} \cos 2n\varphi \cos(\alpha\beta \cos\theta \cos\varphi) d\varphi = \frac{\pi}{2} J_{2n}(\alpha\beta \cos\theta).$$

В (9) использованы разложение и сумма ряда [10], свойство ортогональности тригонометрических функций:

$$\cos(\alpha\beta \cos\theta \cos\varphi) = J_0(\alpha\beta \cos\theta) + 2 \sum_{k=1}^\infty J_{2k}(\alpha\beta \cos\theta) \cos 2k\varphi; \\ \sum_{k=0}^\infty (-1)^k \cos k\alpha J_{2k}(z) = \frac{1}{2} \cos\left(z \cos \frac{\alpha}{2}\right) + \frac{1}{2} J_0(z).$$

Таким образом:

$$\sum_{i=-\infty}^\infty J_{k+i+n}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{k+i-n}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{i+n}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) J_{i-n}\left(\alpha\frac{\beta}{2}\right) = \frac{2}{\pi} (-1)^{k-n} \int_0^{\pi/2} \cos 2k\theta J_{2n}^2(\alpha\beta \cos\theta) d\theta. \quad (10)$$

Последний интеграл берется подстановкой $\cos\theta = x$ с использованием (8) [11]:

$$\frac{2}{\pi} (-1)^{k-n} \int_0^{\pi/2} \cos 2k\theta J_{2n}^2(\alpha\beta \cos\theta) d\theta = \int_0^1 \frac{T_{2k}(x)}{\sqrt{1-x^2}} \int_0^{\pi/2} J_{2n}(\alpha\beta x \cos t) dt dx =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(-1)^n \sqrt{\pi} \beta^{2k} \Gamma(k+1/2)}{2^{2k+1} k!(k-n)!(k+n)!} {}_2F_3(k+1/2, k+1/2; 2k+1, 1+k-n, 1+k+n; -\alpha^2 \beta^2), k \geq n; \\
 &\frac{(-1)^k \sqrt{\pi} \beta^{2n} \Gamma(n+1/2)}{2^{2n+1} n!(n-k)!(k+n)!} {}_2F_3(n+1/2, n+1/2; 2k+1, 1+n-k, 1+k+n; -\alpha^2 \beta^2), k < n.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Если в (7) i и n являются одновременно нечетными, то, повторяя подобную последовательность действий, получим:

$$\sum_{i=-\infty}^{\infty} J_{k+i+n+1} \left(\alpha \frac{\beta}{2} \right) J_{k+i-n} \left(\alpha \frac{\beta}{2} \right) J_{i+n+1} \left(\alpha \frac{\beta}{2} \right) J_{i-n} \left(\alpha \frac{\beta}{2} \right) = \frac{2}{\pi} (-1)^{k-n} \int_0^{\pi/2} \cos 2k\theta J_{2n+1}^2(\alpha\beta \cos\theta) d\theta. \tag{12}$$

Теперь необходимо выполнить интегрирование по β в (6) при учете представлений (11) в (10) и (12). Заметим, что первый двойной ряд в (4) суммируется (10) при $k=0$. Чтобы получить универсальную формулу при интегрировании по β в (11) и (12), обозначим $r = \min(k, m)$; $s = \max(k, m)$; $t = \min(k, n)$; $u = \max(k, n)$. Тогда искомым интеграл (3) выразится через G -функцию Мейера [10]

$$\begin{aligned}
 C_{m,n}(\alpha) &= \frac{\beta_{m,n}}{\pi^2} \left\{ \frac{\alpha^{2n}}{2} G_{6,6}^{3,3} \left(\alpha^2 \middle| \begin{matrix} 1/2-n & 1/2-n & 1/2-m-n & 1/2-n & 1/2-n & 1/2+m-n \\ 0 & -n & -n & -2n & -n & -n \end{matrix} \right) + \right. \\
 &+ \left. \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+r+t} \alpha^{2u} G_{6,6}^{3,3} \left(\alpha^2 \middle| \begin{matrix} 1/2-u & 1/2-u & 1/2-s-u & 1/2+k+m-s-u & 1/2+|k-m|-s & 1/2+s-u \\ 0 & -u & -u & -k-n & -|k-n| & -2u \end{matrix} \right) \right\}.
 \end{aligned}$$

Решение контактной задачи для прямоугольной пластинки

Рассмотрим прямоугольную пластинку размерами $2a \times 2b$ на упругом полупространстве под действием внешней нагрузки. Интегральное уравнение для определения контактных напряжений между пластинкой и полупространством имеет вид

$$\int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{p(\xi, \eta)}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} = \frac{\pi E}{1-\nu^2} w(x, y), \tag{13}$$

где E, ν – упругие постоянные полупространства; $p(\xi, \eta)$ – неизвестный закон распределения контактных напряжений; $w(x, y)$ – перемещение пластинки.

Принимаем:

$$\begin{aligned}
 p(\xi, \eta) &= \frac{1}{\sqrt{1-\frac{\xi^2}{a^2}} \sqrt{1-\frac{\eta^2}{b^2}}} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} B_{i,k} T_i \left(\frac{\xi}{a} \right) T_k \left(\frac{\eta}{b} \right); \\
 w(x, y) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{m,n} T_m \left(\frac{x}{a} \right) T_n \left(\frac{y}{b} \right),
 \end{aligned} \tag{14}$$

где $A_{m,n}, B_{i,k}$ – неопределенные коэффициенты.

Подставим (14) в (13) и выполним интегрирование с учетом представления (2), предвари-

тельно перейдя к безразмерным координатам и приняв $\alpha = b/a$. В результате получим:

$$\begin{aligned}
 &\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_{m,n} C_{m,n}(\alpha) B_{m,n} T_m(x) T_n(y) = \\
 &= \frac{\pi E}{(1-\nu^2)b} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{j,l} T_j(x) T_l(y), \tag{15} \\
 &\varepsilon_{0,0} = \pi^2; \varepsilon_{m,0} = \varepsilon_{0,m} = \frac{\pi^2}{2}; \varepsilon_{m,n} = \frac{\pi^2}{4}.
 \end{aligned}$$

Приравнявая в (15) коэффициенты при одинаковых произведениях полиномов Чебышева, получаем зависимости:

$$\begin{aligned}
 A_{0,0} &= \frac{(1-\nu^2)\pi b}{E} C_{0,0}(\alpha) B_{0,0}; \\
 A_{0,1} &= \frac{(1-\nu^2)\pi b}{2E} C_{0,1}(\alpha) B_{0,1}; \\
 A_{1,0} &= \frac{(1-\nu^2)\pi b}{2E} C_{1,0}(\alpha) B_{1,0}; \\
 &\dots \\
 A_{m,n} &= \frac{(1-\nu^2)\pi b}{4E} C_{m,n}(\alpha) B_{m,n}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

С другой стороны, из уравнений равновесия всей пластинки следует:

$$B_{0,0} = \frac{R}{\pi^2 ab}; B_{0,1} = \frac{2M_y}{\pi^2 a^2 b}; B_{1,0} = \frac{2M_x}{\pi^2 ab^2}, \quad (17)$$

где R, M_x, M_y – равнодействующая внешней нагрузки и моменты равнодействующей относительно осей координат.

Из (16) и (17) можно получить явные выражения для линейного и угловых перемещений прямоугольного штампа на упругом полупространстве:

$$\begin{aligned} w_0 &= \frac{R(1-\nu^2)}{\pi E a} C_{0,0}(\alpha); \\ \varphi_y &= \frac{2M_x(1-\nu^2)}{\pi E ab} C_{0,1}(\alpha); \\ \varphi_x &= \frac{2M_y(1-\nu^2)}{\pi E ab} C_{1,0}(\alpha). \end{aligned} \quad (18)$$

В табл. 1 приведены величины перемещений прямоугольного штампа на упругом полупространстве по данным других авторов и предлагаемой методики.

Таблица 1

$\alpha = \frac{b}{a}$	Перемещение $\frac{Ea}{R(1-\nu^2)}$			Угол поворота $\frac{Eab}{M_y(1-\nu^2)}$	
	По [1]	По [7]	По автору	По [1]	По автору
1,0	0,460	0,4265	0,438	0,570	0,520
0,5	0,318	–	0,314	0,644	0,611
0,2	0,181	–	0,181	0,695	0,729

Для пластинки конечной жесткости решение получим методом Ритца [12]. Энергия изгиба прямоугольной пластинки выразится через функцию ее перемещений (14) формулой

$$\begin{aligned} U &= \frac{D}{2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left\{ \left[\left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dy^2} \right)^2 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (1-\nu) \left[\frac{d^2 w}{dx^2} \frac{d^2 w}{dy^2} - \left(\frac{d^2 w}{dxdy} \right)^2 \right] \right\} dx dy, \end{aligned} \quad (19)$$

где D, ν – цилиндрическая жесткость пластинки и коэффициент Пуассона материала пластинки.

Работа реактивных напряжений на перемещениях пластинки получится в таком виде:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b p(x,y) w(x,y) dx dy = \\ &= \frac{\pi^2}{2} ab \left[A_{0,0} B_{0,0} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} (A_{0,i} B_{0,i} + A_{i,0} B_{i,0}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{\infty} A_{i,i} B_{i,i} \right], \end{aligned} \quad (20)$$

Работа внешней нагрузки

$$\Pi = - \int_{-a}^a \int_{-b}^b q(x,y) w(x,y) dx dy. \quad (21)$$

Составим выражение для полной энергии изгибаемой пластинки на упругом основании и действующей на нее внешней нагрузки

$$\Omega = U + \Psi + \Pi. \quad (22)$$

Согласно методу Ритца, про дифференцируем (22) по каждому из неизвестных коэффициентов $A_{m,n}$ и полученные результаты приравняем нулю, предварительно подставив соотношение связи (16) между коэффициентами $A_{m,n}$ и $B_{m,n}$. Получим систему линейных алгебраических уравнений относительно $A_{m,n}$, порядок которой определяется количеством членов ряда (14). Решение системы дает возможность определить перемещения пластинки и, следовательно, усилия и распределение контактных напряжений в ней (16).

Пример. Рассмотрим прямоугольную пластинку на упругом основании под действием сосредоточенной силы $R = 100$ кН, приложенной в точке с координатами $x_p = a/2; y_p = b/2; D = 2000$ кН·м; $\nu = 0,2; a = 2$ м; $b = 3$ м; $E = 6670$ кН/м².

$$\text{Задаемся } w(x,y) = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 A_{m,n} T_m\left(\frac{x}{a}\right) T_n\left(\frac{y}{b}\right).$$

Опуская промежуточные результаты, получим:

$$\begin{aligned} A_{0,0} &= 0,00276 \text{ м}; \quad A_{0,1} = 0,00176 \text{ м}; \quad A_{0,2} = -0,00084 \text{ м}; \\ A_{1,0} &= 0,00144 \text{ м}; \quad A_{1,1} = 0,00138 \text{ м}; \quad A_{1,2} = -0,00069 \text{ м}; \\ A_{2,0} &= -0,00041 \text{ м}; \quad A_{2,1} = -0,00048 \text{ м}; \quad A_{2,2} = 0,00012 \text{ м}. \end{aligned}$$

На рис. 1 показаны вертикальные перемещения поверхности пластинки от действия сосредоточенной силы.

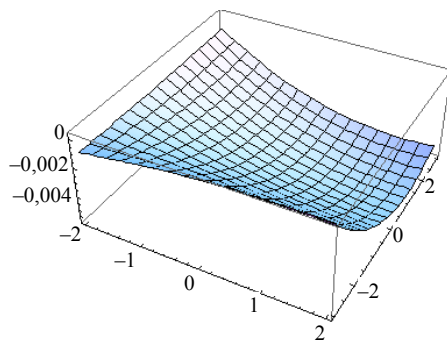


Рис. 1. Вертикальные перемещения поверхности прямоугольной пластинки от действия сосредоточенной силы

Fig. 1. Vertical displacements of rectangular plate surface due to action of concentrated force

ВЫВОДЫ

1. Матрица коэффициентов при неизвестных разрешающей системы уравнений, полученная при дифференцировании (22), является редко заполненной диагональной и может быть решена в общем виде для не слишком большого числа неизвестных. Это позволяет строить поверхности влияния вертикальных перемещений точек пластинки и, как следствие [13], находить перемещения пластинки от любой внешней нагрузки.

2. При расчете пластинки на иной модели упругого основания, отличной от полупространства, следует представить вертикальные перемещения границы упругого основания от действия сосредоточенной силы в виде решения Буссинеска и ряда по полиномам Чебышева [8]

$$K(x, \xi, y, \eta) = \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + \alpha^2(y-\eta)^2}} + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} G_{m,n}(\alpha) T_m(x) T_m(\xi) T_n(y) T_n(\eta)$$

и использовать вышеописанную процедуру для расчета прямоугольной пластинки на упругом полупространстве.

ЛИТЕРАТУРА

- Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. М.: Стройиздат, 1984. 679 с.
- Соломин, В. И. Расчет прямоугольных плит на упругом полупространстве методом сеток / В. И. Соломин // Строительная механика и расчет сооружений. 1960. № 6. С. 12–17.
- Алейников, С. М. Метод граничных элементов в контактных задачах для упругих пространственно неоднородных оснований / С. М. Алейников. М.: Изд-во АСВ, 2000. 754 с.
- Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. М.: Стройиздат, 1962. 262 с.
- Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. Минск: БНТУ, 2002. 128 с.
- Босаков, С. В. Метод Ритца в контактных задачах теории упругости / С. В. Босаков. Брест, 2006. 108 с.
- Бородачев, Н. М. О вдавливании штампа с плоским квадратным основанием в упругое полупространство / Н. М. Бородачев // Прикладная механика. 1999. Т. 35, № 10. С. 21–26.
- Развитие теории контактных задач в СССР / под ред. Л. А. Галина. М.: Наука, 1976. 493 с.
- Сеймов, В. М. Динамические контактные задачи / В. М. Сеймов. Киев: Наук. думка, 1976. 283 с.
- Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. М.: Физматлит, 1963. 1097 с.
- Прудников, А. П. Интегралы и ряды. Специальные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. М.: Наука, 1983. 752 с.
- Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности / А. В. Александров, В. Д. Потапов. М.: Высш. шк., 1990. 400 с.
- Ржаницын, А. Р. Строительная механика / А. Р. Ржаницын. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.

Поступила 18.11.2019

Подписана в печать 28.01.2020

Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

- Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on an Elastic Foundation*. Moscow, Stroyizdat Publ. 679 (in Russian).
- Solomin V. I. (1960) Calculation of Rectangular Plates on Elastic Half-Space by Grid Method. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschet Sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, (6), 12–17 (in Russian).
- Aleinikov S. M. (2000) *Boundary Element Method in Contact Problems for Elastic Spatial-and-Nonhomogeneous Bases*. Moscow, ASV Publ. 754 (in Russian).
- Zhemochkin B. N., Sinitsyn A. P. (1962) *Practical Methods of Calculation for Beams and Slabs on Elastic Foundation*. Moscow, Stroyizdat Publ. 262 (in Russian).
- Bosakov S. V. (2002) *Static Calculations of Slabs on Elastic Foundation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 128 (in Russian).
- Bosakov S. V. (2006) *Ritz's Method in the Contact Problems of the Theory of Elasticity*. Brest, Brest State Technical University. 108 (in Russian).
- Borodachev N. M. (1999) Impression of a Punch with a Flat Square Base into an Elastic Half-Space. *International Applied Mechanics*, 35 (10), 989–994. <https://doi.org/10.1007/bf02682309>.
- Galim L. A. (ed.) (1976) *Developments of the Theory of Contact Problems in the USSR*. Moscow, Nauka Publ. 493 (in Russian).
- Seimov V. M. (1976) *Dynamic Contact Tasks*. Kiev, Naukova Dumka. 283 (in Russian).
- Gradsteyn I. S., Ryzhik I. M. (1963) *Table of Integrals, Series and Products*. Moscow, Fizmatlit Publ. 1097 (in Russian).
- Prudnikov A. P., Brychkov Yu. A., Marichev O. I. (1983) *Integrals and Series. Special Functions*. Moscow, Nauka Publ. 752 (in Russian).
- Alexandrov A. V., Potapov V. D. (1990) *The Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
- Rzhanitsyn A. R. (1991) *Structural Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 439 (in Russian).

Received: 18.11.2019

Accepted: 28.01.2020

Published online: 29.05.2020

Способы борьбы с зимней скользкостью

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев¹⁾, докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾,
докт. хим. наук, проф. В. Н. Яглов¹⁾, асп. В. В. Гиринский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Известно несколько способов борьбы с зимней скользкостью на дорогах – фрикционный, тепловой, химический, комбинированный и конструкционный. Довольно широкое применение нашел фрикционный метод борьбы со скользкостью. Он основывается на повышении сцепления колеса с дорожным плотным, покрытым наледью. В качестве фрикционного сырья используют песок, шлак, отсева каменных материалов, а также фрикционные материалы, подвергаемые нагреванию. Тепловой метод разделяют по типу обогрева поверхности дорожного покрытия на кондуктивный и конвективный, при которых подогрев дорожных покрытий происходит снизу (электрообогрев) либо сверху (тепловой струей). Недостатки данного способа – его дороговизна при использовании тепловых струй и вредное воздействие высоких температур на дорожное покрытие. Сегодня наиболее популярным способом борьбы с зимней скользкостью является химический метод. Для предотвращения образования скользкости на дорожном покрытии или удаления льда с него предусматривается обработка твердыми или жидкими реагентами. Принцип их действия заключается в понижении температуры замерзания раствора на поверхности дорожного полотна. Борьба с зимней скользкостью в основном ведется комбинированным способом с помощью посыпки дорог песчано-соляной смесью. В настоящее время назрела необходимость полного или частичного отказа от применения хлоридов при борьбе с зимней скользкостью. В данном случае наиболее перспективное направление – предупреждение образования гололеда за счет создания покрытий автомобильных дорог, обладающих противогололедными свойствами, т. е. введения антигололедных реагентов в состав дорожного покрытия (конструкционный способ). Однако этот метод повышает стоимость готового покрытия дороги.

Ключевые слова: противогололедные материалы, хлорид кальция (магния, натрия), способы борьбы с зимней скользкостью

Для цитирования: Способы борьбы с зимней скользкостью / М. К. Пшембаев [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 230–240. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-230-240>

Methods for Prevention of Winter Slippery

М. К. Pshembaev¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾, V. N. Yaglov¹⁾, V. V. Girinsky¹⁾

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

Abstract. There are several methods for prevention of winter slippery on the roads – frictional, thermal, chemical, combined and structural. The friction method of combating slippery has found quite wide application. The method is based on increasing a wheel grip with iced road. Sand, slag, screening of stone materials and friction materials subjected to heating are used as a friction raw material. A thermal method is divided in conductive and convective according to a surface heating type in which a pavement is heated from below (electric heating) or from above (with a heat stream). Disadvantages of this method are its high cost when using thermal jets and harmful effects of high temperatures on a road surface. Nowadays a chemical method is considered as the most popular one to combat winter slippery. Treatment with solid or liquid reagents is provided in order to prevent slipping on the road surface or removing ice from it. The principle of their action is to lower a freezing temperature of the solution on the surface of the roadway. The fight against winter slippage is mainly carried out in a combined way by sprinkling roads with a sand and salt mixture. Currently, there is a need to completely or partially abandon the use of chlorides in the fight against winter slippery. In this case, the most promising direction is to prevent icing by creating coatings for roads with anti-icing properties that is introduction of anti-icing reagents in the composition of the road surface (construction method). This method makes it possible to increase cost of a finished road surface.

Keywords: anti-icing materials, calcium chloride (magnesium chloride, sodium chloride), methods for prevention of winter slippery

For citation: Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Girinsky V. V. (2020) Methods for Prevention of Winter Slippery. *Science and Technique*. 19 (3), 230–240. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-230-240> (in Russian)

Адрес для переписки

Яглов Валерий Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67, корп. 18а
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-29
fgde@bntu.by

Address for correspondence

Yaglov Valeryi N.
Belarusian National Technical University
67, housing 18a, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-29
fgde@bntu.by

Введение

Непрерывный рост автомобильного парка, увеличение объема грузооборота и перевозок пассажиров предъявляют все более жесткие требования к содержанию автомобильных дорог, а также к обеспечению безопасности движения по ним. Решение этих проблем связано с двумя комплексами задач: борьбой с зимней скользкостью с применением противогололедных материалов (ПГМ) и поддержанием дорожных покры-

тий в оптимальном состоянии с помощью специализированных пропиток, предотвращающих старение и износ дорожного полотна.

Методы борьбы с зимней скользкостью

Современные методы борьбы с зимней скользкостью по принципу своего действия разделяются на пять основных типов (табл. 1): химический, фрикционный, комбинированный (химико-фрикционный), конструкционный и тепловой [1–11].

Таблица 1

Характеристика основных методов борьбы с зимней скользкостью
Characteristics of main methods for prevention of winter slippery

Метод	Химический	Фрикционный	Комбинированный	Конструкционный	Тепловой
Используемый материал	Соли, антигололедные реагенты	Песок, щебень, шлак и т. п.	Фрикционный материал и химический реагент	Добавки в асфальтобетон, гидрофобизаторы	Топливо или электроэнергия
Время распределения материала	До, в период или после образования зимней скользкости	После образования зимней скользкости	В период или после образования зимней скользкости	При устройстве покрытия из ПГМ-гидрофобизаторов (в процессе его эксплуатации до наступления заморозков)	В период или после образования зимней скользкости
Температура использования	До минус 12 °С (отдельные – до минус 90 °С)	Не ограничена	Не ограничена	До минус (3–7) °С	Не ограничена
Продолжительность действия	В зависимости от количества ПГМ, интенсивности движения и погодных условий			Добавки в асфальтобетон – до 7 лет; гидрофобизаторы – до 2 лет	Не органичена во время гололеда
Эффективность использования	Высокая – при соблюдении технологии работ	Средняя			Высокая
Достоинство	Высокая плавящая способность, небольшая норма расхода, обработка участка большой площадью одним автомобилем	Простота обработки, низкая стоимость материала, мгновенное повышение коэффициента сцепления	Доступность, повышение коэффициента сцепления, возможность многократного использования	Снижение затрат на ликвидацию гололеда на проезжей части за счет введения ПГМ в состав покрытия	Высокая плавящая способность, возможность многократного использования
Недостаток	Высокая стоимость материала, ограничения условий использования (по температуре, интенсивности движения), жесткие требования к соблюдению технологии работ	Большая норма россыпи, использование большого количества распределителей, значительный объем заготовки ПГМ, слабое закрепление ПГМ на покрытии	Высокие требования к качеству материала, нарушение технологии резко ухудшает условия движения	Снижение межремонтных сроков службы покрытия	Высокий расход топлива

Химический способ борьбы с зимней скользкостью

Противогололедные материалы – это вещества, которые вступают в химическую реакцию с частицами льда и эффективно разрушают ледяные образования. Наиболее известными примерами химических антигололедных реагентов могут служить такие средства, как хлориды, нитраты, ацетаты, формиаты, а также смеси органических веществ [1–10].

С целью прогнозирования свойств систем с низкими температурами замерзания, которые могут быть применены как антигололедные средства, авторами статьи изучена зависимость температуры замерзания некоторых базовых составов от постепенного разбавления их водой (табл. 2–11).

Таблица 2

Система этиловый спирт – вода ($C_2H_5OH-H_2O$) Ethyl alcohol – water ($C_2H_5OH-H_2O$) system

Содержание спирта, мас. %	Температура замерзания, °С
46,3	–34
56,1	–41
72,9	–51

Таблица 3

Система глицерин – вода ($CH_2OH-CHOH-CH_2OH-H_2O$) Glycerine – water ($CH_2OH-CHOH-CH_2OH-H_2O$) system

Содержание глицерина, мас. %	Температура замерзания, °С
60,0	–35
70,0	–40

Таблица 4

Система $CaCl_2-H_2O$ $CaCl_2-H_2O$ system

Содержание $CaCl_2$, г/100 г H_2O	Температура замерзания, °С
34,6	–31
36,2	–35
37,9	–39
39,7	–44
41,6	–50
42,7	–55

Таблица 5

Система $MgCl_2-H_2O$ $MgCl_2-H_2O$ system

Содержание $MgCl_2$, г/100 г H_2O	Температура замерзания, °С
25,2	–32
25,9	–34

Таблица 6

Система ацетат калия – вода ($CH_3COOK-H_2O$) Potassium acetate – water ($CH_3COOK-H_2O$) system

Содержание соли, г/100 г H_2O	Температура замерзания, °С
40,0	–29
50,0	–58

Таблица 7

Система ацетат калия – глицерин – вода ($CH_3COOK-CH_2OH-CHOH-CH_2OH-H_2O$)

Potassium acetate – glycerine – water ($CH_3COOK-CH_2OH-CHOH-CH_2OH-H_2O$) system

Содержание раствора, воды, мас. %			Температура замерзания, °С
CH_3COOK	$CH_2OH-CHOH-CH_2OH$	H_2O	
35	15	50	–34
40	10	50	–37
45	5	50	–44
50	10	40	} Высоковязкая некрст. до минус 70 °С
55	5	40	

Таблица 8

Система изопропиловый спирт – глицерин – вода ($[(CH_3)_2CHOH-CH_2OH-CHOH-CH_2OH-H_2O]$)

Isopropil alcohol – glycerine – water ($[(CH_3)_2CHOH-CH_2OH-CHOH-CH_2OH-H_2O]$) system

Содержание раствора, воды, мас. %			Температура замерзания, °С
$(CH_3)_2CHOH$	$CH_2OH-CHOH-CH_2OH$	H_2O	
30	30	40	–33

Таблица 9

Система $CaCl_2-MgCl_2-H_2O$ $CaCl_2-MgCl_2-H_2O$ system

Содержание раствора, воды, мас. %			Температура замерзания, °С
$CaCl_2$	$MgCl_2$	H_2O	
12,10	12,1	75,80	–34
21,27	7,19	71,54	–47
20,37	6,87	72,82	–40
19,10	6,46	74,41	–27
27,69	1,99	70,32	–45
21,34	1,75	73,91	–33
11,40	11,40	77,20	–35
12,20	12,20	75,60	–35
19,20	6,40	74,40	–35
25,00	1,60	73,40	–35
12,70	12,70	64,60	–40
20,30	6,70	73,00	–40
16,40	1,70	71,90	–40
21,10	6,00	72,90	–45
27,60	1,60	70,80	–45

Таблица 10

Система $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$
 $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ system

Содержание раствора, воды, мас. %				Температура замерзания, °С
CaCl_2	MgCl_2	NaCl	H_2O	
11,15	11,15	1,85	78,85	-32
11,36	11,36	1,25	46,02	-35
11,95	11,95	1,32	74,78	-40
20,40	6,80	1,65	71,15	-47

Таблица 11

Система $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$
 $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ system

Содержание раствора, воды, мас. %			Температура замерзания, °С
CaCl_2	NaCl	H_2O	
23,72	4,00	72,28	-35
24,20	1,00	74,80	-30
23,80	1,80	74,40	-30
22,00	3,80	74,20	-30
25,80	1,00	73,20	-35
25,60	1,80	72,60	-35
23,80	4,00	72,20	-35
26,25	2,19	71,56	-38
27,20	1,00	71,80	-40
28,74	1,11	70,15	-45
26,80	2,00	72,20	-40

Из приведенных данных видно, что с разбавлением водой выделенных базовых растворов температуры их замерзания резко повышаются. Массовые соотношения компонентов систем в расчете на сухое вещество остаются постоянными. Сравнение составов с 85–90 мас. % воды позволяет выделить наиболее пригодные для использования в качестве основных антигололедных средств пролонгированного действия.

Температура замерзания природного высококонцентрированного рассола, добываемого при разработке нефтяных месторождений, минус 25 °С. Рассол – бесцветная или с желтоватым оттенком жидкость без запаха, его характеристики: плотность 1200–1300 кг/м³; массовая доля сухих веществ 25,0–35,0 %; содержание ионов, % от массовой доли: 56,0–66,0 хлора, 6,0–21,0 кальция, 0,5–3,5 магния; рН = 4,5–6,6. Рассол является пожаро- и взрывобезопасным веществом. По степени воздействия на организм человека относится к веществам 3-го класса опасности. Может быть применен в качестве антигололедного средства при температуре окружающей среды до минус 15 °С.

Низкую температуру замерзания (менее минус 70 °С) показала головная фракция при получении этилового спирта. Согласно ТУ РБ 00966671, фракция содержит: объемную долю этилового спирта – не менее 88,3 %; массовую концентрацию альдегидов в пересчете на уксусный альдегид – менее 2 г/дм³ безводного спирта; массовую концентрацию сложных эфиров в пересчете на уксусно-этиловый эфир – не более 60 г/дм³ безводного спирта; массовую концентрацию высших спиртов (сивушного масла) – не более 2,5 г/дм³ безводного спирта; объемную долю метилового спирта – не более 6,0 %.

Добавка глицерина к исходному материалу в объемных соотношениях 5:5, 5:4, 5:3, 5:2 и 5:1 повышала вязкость системы при температуре минус 30 °С, но температура замерзания во всех составах осталась менее минус 70 °С.

Антигололедный реагент (АГР) ацетат калия «Нордикс» по своим свойствам в два раза эффективнее хлорида кальция. Ион калия усваивается растениями, а уксусная кислота, образующаяся при гидролизе этой соли, является биологически разлагаемым веществом. АГР – это не просто растворы солей, в их состав обязательно добавляют ингибиторы, стабилизаторы и буферы, количество которых строго контролируется.

Представляет интерес также смесь ацетатов кальция и магния, которая может быть получена при взаимодействии уксусной кислоты и доломита $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$. Этот относительно дешевый препарат весьма эффективен. При использовании после разбавления водой в точке его следов не обнаружено. Коррозионное действие на металлы данной смеси ацетатов сравнили с действием воды. Вместе с тем эта смесь эффективна только до минус 7 °С.

Фрикционный метод борьбы с гололедом

После долгих проб, ошибок и научных исследований западноевропейские страны практически полностью отказались от использования химических реагентов для плавления снега и льда. В Берлине, например, закон разрешает применять соль только на опасных участках дорог. Химикаты наносят слишком очевидный вред окружающей среде и городскому хозяйству. Мелкий песок тоже не лучший вариант. Он пылит, попадает в легкие и не годен к вторичному использованию. Тогда как каменная

крошка экологична и экономична, хотя изначально обходится дороже соли. Метод разбрасывания гранитной крошки называют фрикционным. Гололед этим способом полностью не устранить, но сцепление колес с дорогой улучшается.

В 2004 г. в Швеции внедрили новый метод борьбы с гололедом, который предложил шведский ученый Торгейр Ваа. Песок в пропорции 7:3 смешивают с горячей водой ((90–95) °С) и разбрызгивают на улицах. Горячий песок вплавается в снег и делает поверхность шероховатой. Такой обработки хватает на три-семь дней с ежедневным трафиком около 1500 автомобилей, или пока не пройдет новый снегопад.

Гранитная крошка, представляющая собой небольшие фракции гранитного камня, предназначена для посыпки дорог в зимний период. Она уже частично применяется в России. Одна из причин ограничения – специфика городской канализации и особенности использования гранитной крошки. Так, 70 % городских стоков – это так называемая общесплавная канализация, т. е. вода из ливневых стоков и домов горожан поступает на станции очистки в едином коллекторе, конструктивно не предназначенном для движения большого количества мелкого камня. Вероятность того, что стоки будут забиты, причем в самых труднодоступных участках, очень высока. В тех местах города, где ливневая канализация изолирована от бытовой, такой способ противодействия гололеду актуален. Но и тут он требует тщательных расчетов применительно к каждой конкретной территории, так как даже изолированные ливневые стоки не всегда могут справиться с прохождением гранитной крошки.

Второй момент, ограничивающий применение этого экологического материала, – порча им дорог. Дело в том, что крошка не на свежем накате, а на чистом асфальте будет не столько предотвращать гололед, сколько разрушать дорогостоящее дорожное покрытие, колеса и днища автомобилей.

Однако крошка весьма эффективна в условиях гололеда. Как правило, при возникновении обледенений в городе используется гранитная крошка высокого качества, представляющая собой мелкодробленый гранитный щебень. Кроме профилактики гололеда, она применяется для благоустройства скверов, парков и т. п. Для получения такой крошки требу-

ется раздробить довольно крупные фракции гранита и получить отсев частиц, не превышающих 2 мм. На завершающем этапе крошка моется, чтобы удалить из нее мелкие песчинки.

В Финляндии и Дании нашли свой способ: на дороге оставляют тонкий (2–3 см) слой снега. Сверху насыпают гранитную или мраморную крошку и плотно укатывают. В ряде случаев на поверхность дороги выливают специальную смесь из воды и щебня. В итоге образуется покрытие, напоминающее наждачную бумагу, сцепные свойства которого – превосходные. Весной каменную крошку собирают специальной техникой, а в следующем году снова используют.

Антигололедные реагенты, обладающие абразивным действием, способствуют не только быстрому таянию льда, сколько увеличению коэффициента сцепления на дорогах, что значительно снижает риск возникновения аварийных ситуаций. Чаще всего абразивные вещества используются для обработки автомобильных дорог высоких категорий и автомагистралей. Самым распространенным средством подобного типа является мраморная и гранитная крошка. Такие методы можно использовать в тех местах, где реализуется отсев гранита и мрамора.

Комбинированный способ борьбы с гололедом

В этом способе борьбы с гололедом используются как вещества, обладающие абразивным эффектом, так и реагенты, оказывающие химическое воздействие на лед, что позволяет значительно повысить эффект от применения антигололедных реагентов. У каждого из перечисленных типов противогололедных средств имеются свои недостатки и достоинства, которые следует учитывать при реализации антигололедных мероприятий для конкретных целей.

Химические реагенты являются наиболее востребованными средствами борьбы с обледенением поверхностей, так как они отличаются высокой скоростью плавления льда, необходимой для эффективного очищения поверхности, и доступной стоимостью. Тем не менее у них имеются следующие недостатки:

– при большой концентрации вещества существует риск негативного воздействия на окружающую среду и железобетонные конструкции. Так, использование технической

соли в больших количествах может привести к засаливанию почвы и возникновению коррозии на металлических поверхностях;

– некоторые химические антигололедные реагенты недостаточно эффективны при низких температурах.

К достоинствам применения абразивных веществ можно отнести быстрое повышение коэффициента сцепления колеса автомобиля с дорожным покрытием, доступность, возможность неоднократного использования. Их главный недостаток – отсутствие плавящей способности льда.

Оптимальный вариант для обработки дорожных поверхностей в городах – комбинированные смеси, которые обладают всеми необходимыми антигололедными качествами и имеют в своем составе антикоррозийные добавки. Важное преимущество таких смесей – экологическая безопасность, что наряду с доступной ценой, делает их достаточно популярными. Они зарекомендовали себя только с положительной стороны, с их помощью можно добиться качественного результата в самые краткие сроки. Благодаря продуманной химической формуле, в состав которой входит несколько сильнодействующих веществ, эти реагенты быстро превращают лед и снег в безопасную растопленную смесь, легкоустраняемую механическими средствами.

Высокая эффективность комбинированных реагентов достигается за счет того, что в них чаще всего используются в различных сочетаниях такие вещества, как мраморный или гранитный щебень, формиаты натрия или ацетаты калия, хлорид натрия (кальция или магния), нитраты и другие соединения.

Конструкционный способ борьбы с гололедом

Возможно также введение в состав покрытия автомобильных дорог веществ, обладающих противогололедными свойствами, в основном – химических ПГМ. В зависимости от производителя реагентов и их предполагаемых условий эксплуатации состав может отличаться. Как правило, используются именно эти компоненты, но их количество может быть различным.

Принцип действия и главное свойство комбинированных реагентов в том, что они

снижают температуру плавления снега и льда. Благодаря этому покрытая льдом поверхность быстро освобождается от гололеда и становится безопасной для движения.

Каждый отдельный реагент должен соответствовать определенным требованиям, быть безопасным для здоровья людей и не наносить вреда окружающей среде. Главные достоинства комбинированных реагентов:

– быстро снижают точку замерзания воды даже при низких температурах воздуха;

– взаимодействие их со льдом и снегом протекает крайне быстро, и опасная масса льда на дороге сразу начинает таять;

– никак не действуют на состояние самого покрытия, не наносят ему вреда и повреждений при использовании ингибиторов коррозии.

Материалы для придания антигололедных свойств покрытиям автомобильных дорог, так же, как и применяемые в химическом методе борьбы с гололедом антигололедные реагенты, должны удовлетворять следующим требованиям:

– иметь низкое значение температуры замерзания раствора эвтектической концентрации, которая также должна быть как можно меньше;

– быстро взаимодействовать со снежно-ледяными отложениями, от чего существенно будет зависеть время ликвидации зимней скользкости, а следовательно, и безопасность дорожного движения;

– не увеличивать скользкость дорожного покрытия до опасных значений, что обусловлено повышенной гигроскопичностью многих антигололедных реагентов;

– не вызывать преждевременного разрушения дорожных покрытий;

– иметь невысокую стоимость, чтобы не приводить к существенному удорожанию готового покрытия;

– не угнетать зеленые насаждения за пределами полосы отвода и оказывать незначительное влияние на растительность, произрастающую у дороги;

– не оказывать отрицательного влияния на металл, резину и кожу;

– иметь удобный способ распределения (для реагентов).

Этим требованиям лучше всего соответствует технический хлористый натрий, который:

– несмотря на более высокую плавящую способность CaCl_2 и MgCl_2 , имеет сопостави-

мые с ними температуры замерзания растворов с концентрацией до 10 %, а также высокую скорость плавления снежно-ледяных отложений, что позволит значительно снизить адгезию льда к поверхности покрытия;

– не приводит к повышению скользкости асфальтобетонного покрытия, в то время как некоторые другие соли, в том числе CaCl_2 , вследствие длительного невысыхания снижают коэффициент сцепления на гладких и микрошероховатых поверхностях, что, согласно действующему Руководству по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах, ограничивает область их применения;

– имеет самую невысокую стоимость из всех возможных для использования в этом качестве промышленно выпускаемых материалов, кроме того, могут применяться многочисленные отходы промышленности, в химическом составе которых содержится более 95 % действующего вещества;

– не раздражает кожу и не оказывает существенного отрицательного влияния на растительность, произрастающую далее 3–4 м от кромки проезжей части;

– технологичен при вводе в состав минеральной части асфальтобетона. Однако может обеспечить антигололедный эффект только в пределах температур от 0 до минус 7 °С; это объясняется тем, что силы смерзания льда с дорожным покрытием возрастают более интенсивно при приближении температуры льда к эвтектической для данного реагента. Эвтектическая температура хлористого натрия – минус 21,2 °С при эвтектической концентрации NaCl 23,3 %, аналогичный показатель хлористого кальция – минус 49,8 °С при эвтектической концентрации CaCl_2 30,5 %. Поэтому применение последнего более эффективно при низких температурах.

Совместное использование хлористых натрия и кальция в соотношении примерно 1:7 (87,5 % NaCl и 12,5 % CaCl_2) приводит к сокращению расхода антигололедной добавки на 25–40 % и расширению диапазона температур до минус 18 °С. Меньший расход комбинированной антигололедной добавки (смесь хлористых натрия и кальция), по сравнению с использованием только хлористого натрия, улучшит экологическую обстановку. Кроме того, хлористый кальций при растворении выделяет большое количество теплоты (реакция

растворения экзотермическая), усиливающей плавление льда, в то время как хлористый натрий при растворении поглощает теплоту (реакция растворения эндотермическая).

Бетонные конструкции обладают большей коррозионной стойкостью к хлористому кальцию, чем к хлористому натрию.

Хлорид натрия слеживается, поэтому рекомендуется добавлять к нему до 10 % более гигроскопичного хлористого кальция, присутствие которого резко снижает слеживаемость смеси.

На основании перечисленного можно сделать вывод о рациональности введения комбинированной антигололедной добавки (смеси хлорида натрия и хлористого кальция) в структуру поверхностного слоя бетона для придания ему антигололедных свойств.

Гидрофобизация бетонных покрытий

Твердые и жидкие хлориды, применяемые для борьбы с зимней скользкостью, обладают агрессивной химической способностью: разрушают металлические поверхности автомобилей, поверхность цементобетонных покрытий в раннем возрасте, бордюры, железобетонные элементы мостов, ливнеотстоки; отрицательно влияют на рост деревьев, зерновых культур и другой придорожной растительности. Поэтому нормы применения хлоридов для борьбы с зимней скользкостью строго ограничены. Зарубежный и отечественный опыт показывает, что установленные нормы – менее предельно допустимых согласно требованиям по охране природы и окружающей среды. Превышение этих требований происходит при распределении хлоридов значительно больше установленных норм или при нарушении правил их хранения, погрузки и транспортировки.

Попытки отказаться от хлоридов для борьбы с гололедом предпринимались во многих странах, однако стоимость зимнего содержания при этом увеличивалась в три и более раз вместе с увеличением числа дорожно-транспортных происшествий.

Для снижения интенсивности коррозии металлов в хлоридную среду добавляют замедлители коррозии – ингибиторы. В процессе исследований выявлены наиболее доступные ингибиторы, которые целесообразно применять при борьбе с зимней скользкостью: гексаметафосфат натрия, гидро- и дигидрофосфат натрия, суперфосфат. Все эти добавки нетоксичны,

не вредят зеленым насаждениям, не влияют отрицательно на свойства дорожных покрытий. К твердым хлоридам добавляют 2–3 % дигидроортофосфата натрия или 5–7 % гидроортофосфата натрия. При использовании жидких раскислителей нормы ингибиторов снижают: 0,5–1,0 % гидро- или дигидроортофосфата или гексаметафосфата натрия.

Многочисленные наблюдения показали агрессивное влияние хлоридов только на цементобетонные покрытия, причем в раннем возрасте – до трех лет. Агрессивность проявляется в нарушении прочности поверхности дорожных плит (монолитных или сборных), шелушении и возникновении раковин. Пока не разработаны эффективные методы устранения химической коррозии цементобетона. Частичный эффект достигается при применении воздухововлекающих добавок – около 0,1 % к массе цемента (мылонафт, абиетиновая смола, сульфитно-спиртовая барда и др.).

Поэтому для борьбы с зимней скользкостью на цементобетонных покрытиях, изготовленных с воздухововлекающими добавками, применять хлориды можно в том случае, если такие покрытия имеют возраст не менее одного года, а на цементобетонных покрытиях без воздухововлекающих добавок, – когда их возраст более трех лет.

Способы предупреждения образования и профилактики зимней скользкости включают гидрофобизацию покрытий, введение в верхний слой покрытия хлоридов (физико-химический метод) и профилактическую россыпь или розлив хлоридов.

Гидрофобизация заключается в нанесении водоотталкивающих веществ. На гидрофильной поверхности вода растекается и замерзает в виде сплошного слоя льда, который прочно скрепляется с поверхностью покрытия. Это сцепление увеличивается за счет образования льда в микротрещинах и порах. На гидрофобной поверхности угол растекания жидкости значительно больше, вода быстро стекает с покрытия, и лед вообще не образуется, или образуется в виде отдельных капелек. Сцепление такого льда в три-четыре раза меньше, чем на гидрофильной поверхности, и его легко удалить щеточным механизмом.

Новым и достаточно надежным является разработанный в МАДИ способ обработки по-

верхности сборных цементобетонных плит – гидрофобизирующей водной эмульсией на основе кремнийорганических соединений. Эмульсию наносят пульверизатором в момент изготовления плит на заводе (расход эмульсии 200–300 г/м²). При этом адгезия льда уменьшается в семь раз, т. е. гололед практически не образуется. Срок службы обработки – около пяти лет.

Физико-химический метод заключается в придании поверхности покрытия гидрофобных свойств путем введения в состав материала соответствующих химических веществ. В США, Канаде, ФРГ, Швейцарии и других странах производят укладку асфальтобетонных покрытий с добавкой «Верглимит», изготовленной на основе хлористого кальция. Такие смеси представляют собой антиобледенители. Асфальтобетонные покрытия, в состав которых входит эта добавка, плавят снег и лед.

В ГипродорНИИ разработали технологию укладки верхнего слоя покрытия из асфальтобетонной смеси, в которую добавляют твердый хлористый натрий – до 5 % массы вяжущего. При этом температура смерзания льда с покрытием снизилась до минус 18 °С, а прочность сцепления льда с покрытием уменьшилась до 10 раз.

В МАДИ разработан состав асфальтобетонной смеси, в которую добавляют водорастворимый шлак (отход производства вторичных алюминиевых сплавов) как противогололедную добавку (до 7 % от массы асфальтобетона). Адгезия льда уменьшается в два-пять раз. Недостаток таких покрытий – их повышенная пористость после растворения добавки, а также наличие влажной поверхности летом. Кроме того, износостойкость этих покрытий может сократиться за счет шелушения.

Весьма перспективны гололедобезопасные покрытия дорог, а также поверхностная обработка покрытий из шламов с кремнийорганическими или другими добавками, снижающими адгезионные свойства льда. Другое направление в создании гололедобезопасных покрытий состоит в придании верхнему слою упругих свойств. В этом случае лед, образующийся на покрытии, будет быстро разрушаться под действием поверхности летом. Кроме того, износостойкость таких покрытий может сократиться за счет автомобилей, что приведет к самоочистке покрытия. Для этих целей в МАДИ

разработаны составы песчаных резинобитумных смесей, в которых содержится от 2 до 7 % резиновой крошки. Слой износа из этих смесей делают толщиной 2 см, он обладает высокими сцепными качествами во влажном состоянии и значительно облегчает борьбу с гололедом.

Профилактический метод борьбы со скользкостью заключается в распределении противогололедных материалов по проезжей части до образования на ней гололедицы или уплотненного снежно-ледяного слоя (наката). Он подразделяется на профилактику образования гололедицы и снежного наката. В первом случае за 30–60 мин до начала образования гололедицы по поверхности покрытия распределяют твердые или жидкие хлориды (расход – от 5 до 20 г/м²). Соединяясь с влагой из воздуха, хлориды образуют соляной раствор, который препятствует возникновению гололедицы. Метод очень экономичен, поскольку требуется минимум противогололедных материалов. Однако при его реализации нужен точный прогноз о возможном появлении гололедицы за 1–2 ч до начала ее образования, чтобы успеть обработать поверхность хлоридами. Для такого прогноза разработаны приборы и сигнализаторы гололедицы, которые пока не отличаются высокой точностью. Автоматизированные системы распределения противогололедных материалов по данным сигнализаторов гололедицы применяются на сложных развязках, отдельных мостах и опасных участках в ряде зарубежных стран.

Тепловой способ борьбы с гололедом

Как показывает анализ существующих методов ликвидации гололедных явлений на опасных участках автомобильных дорог, наиболее перспективным методом ликвидации зимней скользкости на покрытии проезжей части мостовых сооружений является тепловой способ, который характеризуется обширным опытом применения. Так, в России начиная с 1980-х годов, зарегистрированы различные изобретения методов обогрева покрытия проезжей части автомобильных дорог и искусственных сооружений на них. Однако эти новшества не нашли широкого практического применения по объективным причинам, а именно из-за:

- высокой стоимости электроэнергии;
- технологической сложности существующих запатентованных конструкций для обогрева

ва покрытий при их монтаже и дальнейшей эксплуатации;

- суровости и неоднородности климатических условий различных районов.

Решение первых двух проблем – снижение затрат на электроэнергию, упрощение и удешевление конструкции системы обогрева – позволит повысить экономическую привлекательность теплового способа борьбы с зимней скользкостью. Этого можно добиться следующими путями:

- внедрением в систему обогрева устройств, позволяющих получать электроэнергию из возобновляемых источников с минимальными затратами;

- использованием автоматических датчиков состояния поверхности проезжей части транспортных сооружений, позволяющих системе работать в режиме ожидания, включаясь только в случае необходимости, экономя тем самым энергоресурсы;

- разработкой, поиском и внедрением инновационных нагревательных элементов, обладающих минимальной потребляемой мощностью, повышенной теплоотдачей и простотой при относительно низкой стоимости конструкции.

При этом первые два направления уже реализуются. Так, в настоящее время имеется широкий перечень разработок, патентов, практически осуществленных проектов, позволяющих получать электроэнергию путем преобразования солнечной, ветровой, водной энергий (солнечные панели, компактные гидротурбины, ветрогенераторы и т. п.). Постоянный контроль состояния проезжей части может осуществляться автоматическими дорожными метеостанциями (АДМС), производство которых налажено в Российской Федерации. Использование АДМС и генераторов электроэнергии из возобновляемых источников позволит после окупаемости инвестиций на их внедрение (пять-шесть лет) минимизировать затраты на энергоносители и тем самым значительно повысить экономическую эффективность теплового способа борьбы с зимней скользкостью.

Наиболее сложным является третье направление, поскольку необходим не только поиск инновационных нагревательных элементов с минимальной потребляемой мощностью и повышенной теплоотдачей, но и требуется разработка технологических схем их монтажа,

ремонта и обслуживания в конструкции дорожной одежды.

Анализ существующих инновационных теплоносителей для обогрева различных поверхностей позволил выбрать перспективный, нанокпозиционный тепловыделяющий материал. Данный композиционный материал представляет собой смесь токопроводящего технического углерода марки К-163 (18–22 % по массе) с полиуретановым лаком (82–78 % по массе). Область рабочих температур этого покрытия – от 25 до 110 °С. Поскольку полиуретанам свойственна высокая адгезия почти ко всем материалам, тепловыделяющее покрытие можно нанести практически на любую поверхность (например, на геосетку) и уложить под верхний слой бетонного покрытия.

Для оценки степени и скорости нагрева композиционного материала, нанесенного на геосетку, в зависимости от толщины этого слоя, а также подаваемого напряжения и схемы подключения было подготовлено три образца размерами 130×125 мм. С помощью токопроводящего клея закреплялись медные контакты на разном расстоянии друг от друга: между крайними электродами расстояние составило 12,2 см; между крайним левым и средним – 7,2 см, между крайним правым и средним – 5,0 см. На опытные образцы наносили композиционный тепловыделяющий материал слоем различной толщины: на образец 1 – 800 мк, образец 2 – 400 мк, на образец 3 – 300 мк, с последующей их сушкой, а затем отжигом в сушильной камере.

Эксперимент подтвердил рабочую гипотезу о том, что использование геосетки с нанесенным композиционным материалом для нагрева верхнего слоя покрытия с целью предотвращения образования зимней скользкости на дорожных покрытиях возможно. Скорость нагрева и конечная температура композиционного материала могут регулироваться толщиной нанесенного слоя, расстоянием между электродами и подаваемым напряжением.

Проведенные исследования позволили в качестве примера разработать концептуальную модель обогрева покрытия мостового сооружения с помощью нанокпозиционного покрытия, нанесенного на дорожную геосетку.

Геосетка укладывается между верхним или нижним слоем усовершенствованного покрытия в процессе строительства, либо поверх ста-

рого слоя покрытия при его ремонте. Нагрев покрытия происходит в результате излучения тепловой энергии с поверхности тепловыделяющего слоя. Подсоединение нагревательных элементов производится с помощью электрической шины, соединенной электропроводом с блоком управления, установленным на осветительной опоре. Включение и отключение системы обогрева контролируются АДМС, которая также устанавливается на осветительной опоре на высоте 2–4 м над уровнем покрытия.

Предложенная концепция теплового способа направлена на решение следующих практических задач оперативной ликвидации гололедных явлений в осенне-весенние периоды:

- предупреждение образования гололедных явлений за счет нагрева покрытия проезжей части транспортных сооружений по необходимой ширине;

- снижение на треть энергопотребления и, соответственно, затрат за счет автоматизированной работы системы в режиме ожидания и предупреждения льдообразования;

- минимизацию затрат на монтаж системы и ее последующую эксплуатацию;

- увеличение срока службы армированного покрытия путем предотвращения образования отраженных трещин.

Реализация рассмотренного новшества на транспортных сооружениях позволит обеспечить поддержание в надлежащем техническом состоянии покрытия таких объектов и значительно повысить безопасность дорожного движения в переходные периоды года.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены наиболее эффективные методы борьбы с зимней скользкостью на автомобильных дорогах с использованием различных противогололедных материалов:

- химических (растворы солей или сухие соли – хлориды, нитраты, ацетаты, формиаты и др.), которые обладают низкой температурой замерзания и высокой плавящей способностью льда при небольших нормах расхода;

- фрикционных (песок, щебень, шлак и др.), мгновенно повышающих коэффициент сцепления при больших нормах россыпи и относительно слабом закреплении на поверхностном слое дороги;

– антигололедных, которые могут быть введены в состав материала покрытия автомобильных дорог (конструкционные противогололедные материалы);

– химико-фрикционных, когда в составе растворов содержатся как вещества, обладающие абразивным эффектом, так и химические реагенты, что позволяет значительно повысить эффективность антигололедной и сцепной составляющих противогололедных материалов, при этом сокращается межремонтный срок покрытия.

2. Также рассмотрен тепловой способ, когда поверхность дороги снизу обогревается с использованием электроэнергии и сверху – с использованием тепловых струй.

ЛИТЕРАТУРА

1. Советский энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. М.: Советск. энцикл., 1984. 1599 с.
2. Порядок организации и проведения работ по зимнему содержанию автомобильных дорог: ТКП 100–2011 (02191). Минск: Минтранс, 2011. 78 с.
3. Леонович, И. И. Диагностика автомобильных дорог / И. И. Леонович, С. В. Богданович, И. В. Нестерович. М.: ИНФА-М, 2011. 350 с.
4. Пшембаев, М. К. Процессы, протекающие на поверхности бетонных покрытий при их химической защите от зимней скользкости / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев, В. Н. Яглов // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 4. С. 265–270. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-4-265-270>.
5. Шейкин, А. Е. Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. М.: Госстройиздат, 1979. 344 с.
6. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]: под ред. Ф. М. Иванова. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
7. Иванов, Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф. М. Иванов. М.: Транспорт, 1968. 175 с.
8. Шейкин, А. Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А. Е. Шейкин, Л. И. Добшиц. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. 128 с.
9. Руководство по применению бетонов с противоморозными добавками. М.: Стройиздат, 1978. 80 с.
10. Райхель, В. Бетон / В. Райхель, Д. Конрад / пер. с нем. О. П. Мчедлова-Петросяна. М.: Стройиздат, 1979. Ч. 1. Свойства. Проектирование. Испытание. 109 с.
11. Wuth, E. Beanspruchung des Betons Bei Tausalzanwendung / E. Wuth // Betonwerk Fertigteil Technik. 1977. No 11. P. 542–548.

Поступила 17.02.2020

Подписана в печать 20.04.2020

Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. Prokhorov A. M. (ed.) (1984) *Soviet Encyclopedic Dictionary*. Moscow, Publishing House “Sovetskaya Entsiklopedia”, 1599 (in Russian).
2. ТКП 100–2011 (02191). *The Organization and conduct of Winter Maintenance of Roads*. Minsk: Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus. 78 (in Russian).
3. Leonovich I. I., Bogdanovich S. V., Nesterovich I. V. (2011) *Diagnostics of Highways*. Moscow, INFRA-M Publ. 350 (in Russian).
4. Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N. (2016) Processes Proceeding on Concrete Coating Surfaces in Case of their Chemical Protection Against Winter Slipperiness. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (4), 265–270 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-4-265-270>.
5. Sheykin A. E., Chekhovskii Yu. V., Brusser M. I. (1979) *Structure and Properties of Cement Concrete*. Moscow, Gosstroyizdat Publ. 344 (in Russian).
6. Alexeev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Shissl’ P. (1990) *Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Environments*. Moscow, Stroyizdat Publ. 320 (in Russian).
7. Ivanov F. M. (1968) *Corrosion Protection of Reinforced Concrete Transport Structures*. Moscow, Transport Publ. 175 (in Russian).
8. Sheykin A. E., Dobshits L. I. (1989) *Cement Concrete of High Frost Resistance*. Leningrad, Stroyizdat Publ., Leningrad Branch. 128 (in Russian).
9. *Guidline for Application of Concrete with Antifreeze Additives*. Moscow, Stroyizdat Publ. 80 (in Russian).
10. Reichel W., Conrad D. (1976) *Beton. Band 1. Eigenschaften. Projektierung. Prufung*. Berlin, VEB Verlag fur Bauwesen. 295 (in German).
11. Wuth E. (1977) Beanspruchung des Betons Bei Tausalzanwendung. *Betonwerk Fertigteil Technik*, (11), 542–548 (in German).

Received: 17.02.2020

Accepted: 20.04.2020

Published online: 29.05.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-241-251>

УДК 691.327

О стохастическом подходе к оценке долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций при карбонизации бетона

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Осипов¹⁾, инж. В. М. Чик¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Существующие в настоящее время детерминированные модели определения долговечности конструкций не учитывают в полной мере разнообразие воздействующих на них факторов, а также стохастические характеристики используемых природных материалов и условия производства строительных изделий, возможные ошибки при проектировании и строительстве и т. п. Более достоверный подход, определяющий продолжительность и скорость развития деструкционных процессов в конструкциях в процессе эксплуатации, может быть получен при помощи статистических методов, учитывающих вероятностную сущность процесса. В статье приведен возможный подход вероятностного анализа долговечности железобетонных конструкций путем оценки коэффициентов вариации роста глубины карбонизации защитного слоя бетона на основании существующих опытных и расчетных данных об изменении этого показателя в железобетонных конструкциях разного типа. Показана вариабельность существующих подходов по определению долговечности конструкций в целом, в первую очередь за счет используемых в расчетах различных базисных переменных. Проведена стохастическая обработка имеющихся данных о параметрах глубин карбонизации защитного слоя бетона, на основании которой определены значения коэффициентов вариации, позволяющие оценить предполагаемую долговечность железобетонных конструкций, имеющих схожие характеристики и эксплуатируемых в одинаковых условиях. Установлена определенная неоднородность статистических показателей, что свидетельствует о необходимости увеличения сбора информации об исследуемых характеристиках, а также о более тщательной ее обработке. На основании статистической оценки существующих данных установлена целесообразность использования показателя водонепроницаемости бетона в качестве основного фактора, определяющего его долговечность.

Ключевые слова: долговечность, железобетонные конструкции, глубина карбонизации бетона, коэффициент вариации

Для цитирования: Осипов, С. Н. О стохастическом подходе к оценке долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций при карбонизации бетона / С. Н. Осипов, В. М. Чик // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 241–251. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-241-251>

On Stochastic Approach to Evaluation of Service Life for Reinforced Concrete Constructional Elements and Structures during Concrete Carbonization

S. N. Osipov¹⁾, V. M. Chik¹⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The currently existing deterministic models for determination of structure service life do not take into account to the full extent variety of factors that have an effect on them and also stochastic characteristics of the used natural materials and conditions for manufacturing construction products, possible errors during the process of designing and construction etc. More trustworthy approach determining longevity and growth rate of destruction processes for structures in future periods can be obtained with the help of statistic methods that take into account a probabilistic essence of the process. The paper presents

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 156,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b, F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

a possible approach of the probabilistic analysis on reinforced concrete structure service life while assessing rates of variation in depth growth of carbonization in a concrete protective layer on the basis of the existing experimental and calculated data pertaining to changes of the given index in reinforced concrete structures of various types. Variability of the existing approaches for determination of structure longevity as a whole has been shown firstly due to various number of basic variables used in calculations. Stochastic processing of the data on parameters of carbonization depth in the concrete protective layer has been carried out and this processing has made it possible to determine variation rates which allow to assess the pre-supposed service life of reinforced concrete structures having similar characteristics and being operated under analogous conditions. A definitive non-uniformity in statistic indices has been established that testifies about the necessity to increase accumulation of data on the investigated characteristics and to execute its processing more thoroughly. An expedience in usage of a concrete impermeability as a main factor determining its longevity has been established on the basis of statistical assessment of the existing data.

Keywords: service life, reinforced concrete structures, concrete carbonization depth, variation rate

For citation: Osipov S. N., Chik V. M. (2020) On Stochastic Approach to Evaluation of Service Life for Reinforced Concrete Constructional Elements and Structures during Concrete Carbonization. *Science and Technique*. 19 (3), 241–251. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-241-251> (in Russian)

Стохастический подход к оценке долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций позволяет на научной основе оценить этот параметр. В таком случае важным и наиболее сложным действием является правильный выбор вида распределения плотности вероятности случайных значений долговечности.

Применяемые в настоящее время детерминированные модели расчета глубины карбонизации бетона, которые до сих пор являются основой определения долговечности железобетона при обычном воздействии воздуха, влаги и нагрузок, в должной степени не учитывают возможного разнообразия природы разрушения твердых тел вследствие изменения условий эксплуатации, а также стохастические характеристики используемых природных материалов и условия производства строительных изделий, возможные ошибки при проектировании и строительстве, многие другие случайные воздействия.

С учетом аналогии определения срока службы конструкции с вероятностью депассивации арматуры авторы [1] применили вероятностную модель, при которой толщина защитного слоя бетона $a = 20$ мм постоянна, а ее отклонение Δa от проектного значения подчиняется нормальному закону распределения со средней величиной $\mu_a = +6$ мм и среднеквадратическим отклонением $\sigma_a = 10$ мм. При этом многие авторы для статистического моделирования толщины защитного слоя бетона допускают применение нормального закона распределения, что в итоговых расчетах [1] исполь-

зуется при прогнозе глубины карбонизации бетона в среднем 27 мм с обеспеченностью 50 % и до 44 мм – с обеспеченностью 98 % после эксплуатации конструкции на открытом воздухе в течение $t = 100$ лет.

Исходя из этих данных, коэффициент вариации нормального распределения глубины карбонизации бетона x составляет $V_x \approx 0,31$ (31 %) в случае применения нормального распределения значения отклонения от постоянной толщины защитного слоя при $V_0 = \sigma_a/\mu_a = 10/(+6) \approx 1,67$ (167 %), что является большой величиной. Показатель $V_x \approx 0,31$ обеспечивает близкую к нулевой вероятность реализации глубины карбонизации бетона в начале ($t \rightarrow 0$) эксплуатации железобетонного элемента или конструкции, соответствует выражению [1, (7)] для расчета глубины карбонизации бетона $x \rightarrow 0$ при $\geq 3\sigma$ и свидетельствует о правильности полученных результатов сложных вероятностных расчетов [1]. Однако, исходя из начальных условий ($a = 20$ мм и $\mu = +6$ мм), предельное количество среднеквадратических отклонений σ_a до нулевой величины защитного слоя бетона составляет $\alpha_{\max} = (a + \mu_a)/\sigma_a = 2,6$, что соответствует остаточной вероятности реализации 0,0035 [2, с. 110], или 0,35 %, т. е. величине, близкой к нулю. Следовательно, исходные предпосылки использования в [1] нормального закона распределения значений толщины защитного слоя бетона в условиях практических расчетов вполне оправданы и соответствуют выражению [1, (7)], согласно которому $x_c(t) = 0$ (при $t = 0$).

Учитывая практическую важность этих вычислений [1], следует кратко остановиться

на анализе использованных стохастических закономерностей для различных расчетных факторов.

Правильная количественная долговременная оценка надежности строительных материалов, изделий, элементов и конструкций до сих пор является сложной проблемой, о чем свидетельствует [3]. Надежность оценки в первую очередь связана с наличием большого количества базисных переменных и с их трудно определяемыми видами плотности распределения. При этом необходимо учитывать возможность изменения как видов, так и параметров данных распределений в течение длительного периода эксплуатации зданий при различных внешних (температура, влажность, ветер и др.) и внутренних условиях (температура, влажность и др.).

В [3] приведены европейские рекомендации по типам и параметрам распределения базисных переменных расчетных моделей железобетонных конструкций. Так, в табл. 5 [3] для определения прочности бетона на сжатие рекомендуется использовать логнормальное распределение, что противоречит рекомендациям [4] и требованиям СТБ 1544–2005 [5] по применению нормального (Гауссового) распределения. Здесь же [3, табл. 5] для определения защитного слоя бетона предложено применять гамма-распределение, которое при параметре C (целое число) соответствует распределению Эрланга [6, с. 71, 79]. Однако глубина карбонизации бетона, сокращающая толщину его защитного слоя, определяется переменной частью x_m , которая при стандартном отклонении $\sigma_x = 5$ мм и коэффициенте вариации $V = 0,17$ составляет 24 мм, что совпадает с глубиной защитного слоя бетона во многих несущих железобетонных конструкциях современных зданий.

Из 10 базисных переменных [3, табл. 5] четыре соответствуют логнормальному закону распределения, две – постоянны, две – гамма-распределению и по одной – нормальному и экспоненциальному распределениям. При расчетах карбонизации железобетонных конструкций в [1, табл. 6] использовано 15 базисных переменных, для восьми из которых приняты постоянные значения, для пяти – логнормальные и для двух – нормальные распределения, в том числе для оценки отклонения толщины защит-

ного слоя бетона Δa от его проектного значения a с параметрами средней величины $\mu_a = +6$ мм и среднеквадратическим отклонением $\sigma_a = 10$ мм.

В [7, табл. 3] использовано уже 17 базисных переменных, из которых восемь приняты постоянными, пять – с логнормальным и две – с нормальным распределениями, в том числе для оценки отклонения толщины защитного слоя бетона Δa с параметрами средней величины $\mu_a = +5$ мм и $\sigma_a = 5$, одна – с бета-распределением. Постоянная толщина защитного слоя бетона принята $a = 50$ мм, что дает общую среднюю величину $a + \Delta a = 55$ мм.

При описании полной вероятностной модели карбонизации бетона в [8] рассмотрено более 10 базисных переменных со своими видами распределений. Для оценки уровня статистического определения толщины защитного слоя бетона при расчете долговечности предлагается использовать бета-распределение, также в [8, с. 31] для моделирования защитного слоя бетона рекомендуется применять нормальный закон распределения.

Вопросам долговечности бетонов и железобетонов посвящено много исследований, анализ некоторых из них представлен в [9]. Как указывают ученые, в настоящее время бетонные сооружения разрушаются гораздо быстрее, чем в прошлом. Они также обозначили 32 свойства бетонов, которые меняются после внесения в них добавок. При этом за период 1965–2000 гг. изучено только 19 % добавок, влияющих на долговечность бетонов, а на защитную их способность по отношению к арматуре – только 11,82 %. Среди методов оценки долговечности в [9] указаны следующие: по приведенному удлинению образцов, по водонасыщению и распределению влаги, по ключевому структурному фактору, по коэффициенту гидрофильности, по открытой и замкнутой пористости. Для прогнозирования долговечности железобетонных конструкций используются зависимости от температурно-влажностных деформаций в разных возрастах, определение проницаемости для ионов хлора, карбонизация и усадка. При анализе «жизненных циклов» (LCA) может производиться определение нормируемой долговечности, но не самой долговечности. Для нахождения остаточного ресурса зданий и потенциально опас-

ных объектов в [9] использовались: методы динамических испытаний и обследования в целях реконструкции; модели вероятностной динамики повреждений в сложных структурно неоднородных системах; нетрадиционные задачи распознавания образцов и анализ данных по реальному состоянию элементов зданий, выявление закономерности их изменения (старения). Из всего перечня вопросов, возникающих при оценке долговечности бетонов, видна сложность этой проблемы.

Особый интерес представляет сравнение расчетных значений глубины карбонизации бетона во времени, что определяет долговечность железобетона, с фактически наблюдаемыми. Анализ моделей расчета срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации и сравнение результатов расчетов с фактическими данными приведены в [10]. Здесь описаны периоды депассивации арматуры и разрушения конструкции в результате потери сцепления между арматурой и бетоном, выполнено сравнение результатов расчетов по моделям четырех западных исследователей с измеренными значениями глубины карбонизации бетона мостов Беларуси [10, рис. 2]. Как видно из рис. 1, разброс измеренных глубин карбонизации бетона, согласно [10], составляет примерно от двух (при $t \approx 5$ лет) до трех раз (при $t \approx 40-45$ лет). Также необходимо учесть, что представленные на рис. 1 глубины карбонизации бетона мостов являлись средними измеренными величинами без учета их реального вероятностного разброса.

При этом разброс расчетных величин глубины карбонизации бетона по моделям зарубежных исследователей за период 40–50 лет достигает двукратных значений. В случае использования системы MathCad [10] для расчета глубины карбонизации бетона берутся только 12 параметров, среди которых нет фактора особенностей нагрузки на среднюю балку моста, что может оказать существенное влияние [11].

Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов описаны в работах А. И. Васильева [12, 13]. В [12] предложены три модели вероятностной оценки остаточного срока службы железобетонных мостовых конструкций с использованием нор-

мального закона распределения. Рекомендуется при недостаточности статистических данных принимать коэффициент вариации $V \approx 0,20$. В приведенном примере, заимствованном из результатов обследования моста в Ярославской области, получено $V \approx 0,13$.

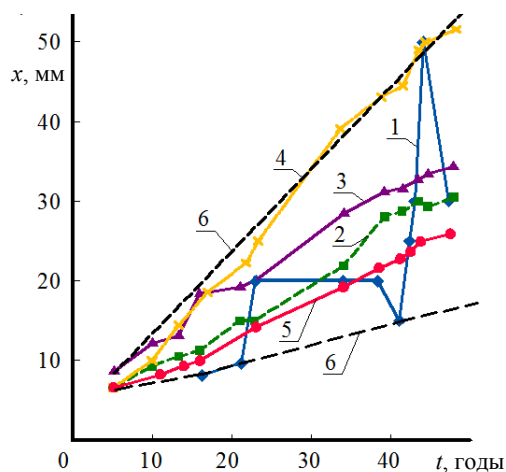


Рис. 1. Связь глубины карбонизации бетона мостов Беларуси с математическими моделями процесса карбонизации: 1 – измеренные значения; 2 – согласно модели De Sitter; 3 – согласно модели Bob; 4 – согласно модели Papadakis; 5 – согласно модели Schiessel; 6 – граница изменения глубины карбонизации бетона

Fig. 1. Relationship of concrete carbonization depth in bridges of Belarus with mathematical models of carbonization process: 1 – measured values; 2 – according to De Sitter model; 3 – according to Bob model; 4 – according to Papadakis model; 5 – according to Schiessel model; 6 – limits of variations in concrete carbonization depth

В [13] приведены методы Н. С. Стрелецкого и А. Р. Ржаницына вероятностной оценки надежности мостов. Для составления алгоритма вероятностной оценки износа конструкции автором [13, с. 30] принят ряд формализованных условий, среди которых «все деградиационные процессы в железобетоне (карбонизация бетона, диффузия хлоридов, коррозия арматуры) являются случайными марковскими процессами», что на современном этапе их изучения правильно. А вот постоянство во всем времени оценки сроков службы изучаемых объектов коэффициентов вариации вызывает большое сомнение. Единого мнения по формированию критериев долговечности пока нет, и имеющиеся оценки носят экспертный характер.

Особый интерес для рассматриваемой проблемы представляет серия статей [14–17], в которых учитывается более широкий круг факторов, влияющих на процесс карбонизации и долговечность железобетонных конструкций [14]. Важны, например, приведенные в [14, табл. 1] фактические глубины карбонизации бетона с небольшой разницей в расходе цемента в зависимости от водоцементного отношения (В/Ц) при $t = 50$ лет эксплуатации и с большой разницей в расходе цемента при эксплуатации в течение 1,5 года. Как показывают расчеты, коэффициент вариации отклонений расчетных глубин карбонизации бетона от фактических при изменении В/Ц от 0,4 до 0,6 для $t = 50$ лет (пять значений) составил $V \approx 0,17$, а при В/Ц = 0,3–0,7 для $t = 1,5$ года (восемь значений) $V \approx 0,19$. В последнем случае три раза фактическая карбонизация бетона отсутствовала ($K_c = 0$) при В/Ц = 0,30–0,35 и расходе цемента $m \geq 665$ кг. Такие относительно небольшие величины V могут являться следствием усреднения приведенных в [15, табл. 1] значений глубин карбонизации бетона, полученных в результате многократных измерений.

В [15, табл. 2, рис. 3] представлены результаты обследования 33 автодорожных мостов Республики Беларусь, построенных в период 1952–1989 гг., т. е. прослуживших от 15–20 до 50–55 лет. Для 17 случаев графически показаны фактические и расчетные (для цемента М400 и М500) глубины карбонизации бетона, причем их сравнительная обработка дала коэффициент вариации $V = 0,26$ [15, с. 16].

Особого анализа заслуживают графические данные, приведенные на рис. 2, заимствованном из [15, рис. 5]. Из рис. 2 видно, что процесс карбонизации бетона по предлагаемой схеме, номограмме Н. К. Розенталя (кривая 3) и расчету по формуле К. Кишитани (кривая 4), а также многим другим источникам начинается с нуля при $t = 0$, а не с определенной постоянной величины [12].

Однако расчеты по моделям Schiessel, Bob, De Sitter и Papadakis (рис. 2, заштрихованная об-

ласть 5), по-видимому, предусматривают наличие определенной величины карбонизации при $t = 0$ или ускоренную карбонизацию в первые пять лет. При $t = 50$ лет глубина карбонизации бетона, согласно рис. 1 и 2, составляет: максимум – около 51 мм и минимум – около 26 мм, что при вероятности 0,95 дает значения коэффициентов вариации, приведенные в табл. 1.

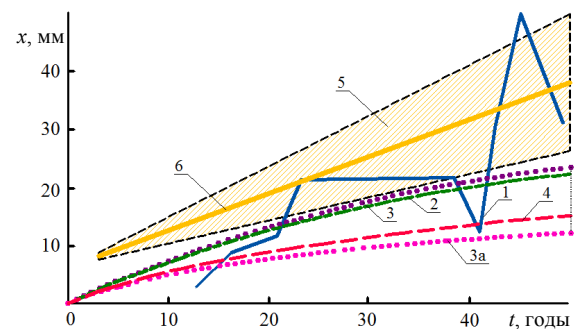


Рис. 2. Глубина карбонизации бетона x с водоцементным отношением 0,44 и расходом цемента 400 кг/м^3 в зависимости от времени эксплуатации t : 1 – фактическая глубина карбонизации бетона автодорожных мостов; 2 – расчет по предлагаемой схеме прогнозирования; 3, 3а – расчет по номограмме Н. К. Розенталя; 4 – расчет по формуле Кишитани; 5 – расчет по моделям Schiessel, Bob, De Sitter, Papadakis; 6 – средняя зависимость $x = f(t)$ для заштрихованной области

Fig. 2. Carbonization depth of concrete x with water cement ratio 0.44 and cement consumption 400 kg/m^3 depending on in-service time t : 1 – actual carbonization depth of concrete in highway bridges; 2 – calculation according to proposed predicting scheme; 3, 3a – calculation according to Rozental nomogram; 4 – calculation according to Kishitani formula; 5 – calculation according to Schiessel, Bob, De Sitter, Papadakis models; 6 – average dependence $x = f(t)$ for shaded region

Эти значения учитывают линейность границ заштрихованной области и примерную линейность расчетных зависимостей (рис. 1, зависимости 2–5) глубины карбонизации бетона x от времени t

$$x_i \approx a_i + b_i t, \quad (1)$$

где a_i , b_i – эмпирические постоянные, мм, мм/год, соответственно.

Таблица 1

Зависимость возможной величины коэффициента вариации V глубины карбонизации бетона от срока службы по расчетным моделям Schiessel, Bob, De Sitter и Papadakis (рис. 2, заштрихованная область 5)

Dependence of probable value for variation V coefficient of concrete carbonization depth on service life according to Schiessel, Bob, De Sitter and Papadakis models (Fig. 2, shaded region 5)

t , годы	5	10	20	30	40	50	100	120	150
V , %	8	12	16	18	19	20	22	22	23

В соответствии с расчетными зависимостями (рис. 1, кривые 2–5; рис. 2, заштрихованная область 5) коэффициенты вариации при $t = 10$ лет составляют $V \approx 0,12$, а при $t = 50$ лет $V \approx 0,20$, что определяется из выражения

$$V = \frac{\gamma - 1}{\alpha(\gamma + 1)}, \quad (2)$$

где $\gamma = x_1/x_2 = (a_1 + b_1t)/(a_2 + b_2t)$; a_1, b_1 – эмпирические постоянные для максимальных величин x_1 (верхняя граница заштрихованной области), равные 6,0 мм и 0,9 мм/год соответственно; a_2, b_2 – эмпирические постоянные для минимальных величин x_2 (нижняя граница заштрихованной области), равные 6,0 мм и 0,4 мм/год.

Как видно из табл. 1, при $t = 100$ лет $V \approx 0,22$, а при $t = 150$ лет $V = 0,23$, что является вполне реальной величиной.

Приведенные на рис. 2 расчетные зависимости $x = f(t)$, построенные по номограмме Н. К. Розенталя (линии 3, 3а), по формуле К. Кишитани (линия 4) и по предлагаемой схеме прогнозирования (линия 2), позволили авторам [15] сделать вывод, что «ни одна из моделей не дает возможности с высокой достоверностью рассчитать глубину карбонизации бетона на всем периоде эксплуатации», составляющем только 50 лет. При этом «для больших сроков эксплуатации фактические данные представляются несколько завышенными и не вписываются в классические представления о зависимости глубины карбонизации от корня квадратного из времени».

Следует отметить, что при $t = 50$ лет диапазон изменения результатов расчетов глубин карбонизации бетона составляет $x_{\min} \approx 12$ мм и $x_{\max} \approx 24$ мм по номограмме Н. К. Розенталя (рис. 2, линии 3, 3а). Это позволяет при надежности 0,95 определить вероятную величину коэффициента вариации $V \approx 0,20$, а отношение x_{\max}/x_{\min} может быть постоянным

$$x_{\max}/x_{\min} = A_1\sqrt{t}/A_2\sqrt{t} = A_1/A_2, \quad (3)$$

где A_1, A_2 – постоянные расчетные коэффициенты, соответствующие максимальной и минимальной величинам карбонизации бетона, мм/год^{0,5}.

Однако во всех рассмотренных случаях следует учесть возможное увеличение коэффициента вариации за счет вероятностного отклонения фактических результатов измерений значений x от расчетных.

В [16, табл. 3, 4] приведены результаты испытаний, выполненных различными организациями и исследователями (НИИЖБ и Харьковский ПромстройНИИПроект, Майера, Ниши и Л. А. Вандаловской), а также расчетов по формуле К. Кишитани. Стохастическая обработка этих данных представлена в табл. 2.

Необходимо отметить, что с учетом погрешностей определения величины коэффициента вариации его возможное значение при условии нормальной плотности распределения вероятности и $t > 0$ может достигать 0,4.

Как следует из табл. 2 (строка 1), по результатам измерений и расчетов только четырех источников [16, табл. 2], при постоянных величинах В/Ц отношения максимальных и минимальных значений глубин карбонизации составляют от 2,27 до 2,95, что для вероятности $P(x) = 0,95$ дает коэффициенты вариации в пределах $V = 0,24–0,30$ при средней величине $\bar{V} \approx 0,28$. Если исходные значения определялись с вероятностью $P(x) = 0,90$, то коэффициенты вариации (табл. 2, строки 2, 3) составляли $V = 0,31–0,39$ при $\bar{V} \approx 0,36$. При этом отношение измеренного верхнего предела глубин карбонизации бетона к расчету авторов [16] находится в пределах (табл. 2, строка 4) от 2,02 до 2,69 раза при среднем значении около 2,4 раза.

В случае использования результатов исследований и расчетов относительных глубин карбонизации бетона 11 источников из [16, табл. 4], значения которых приведены в табл. 2 (строка 5), коэффициенты вариации при вероятности $P(x) = 0,95$ составляют $V = 0,04–0,23$, а при $P(x) = 0,90$ $V = 0,05–0,30$. Однако эти результаты определения коэффициентов вариации (табл. 2) получены при условии принятия значений глубин карбонизации бетона для В/Ц = 0,5 за единицу сравнения. Вследствие этого коэффициенты вариации при постоянных величинах В/Ц, особенно при В/Ц = 0,55 и 0,60, оказались заниженными ($V = 0,04–0,10$).

Если подсчитать построчные [16, табл. 4] величины отношений максимальных относительных глубин карбонизации бетона $x_{\max}^{\text{отн}}$ к минимальным $x_{\min}^{\text{отн}}$ (табл. 2, строка 8), то увидим, что они изменяются от 1,86 до 3,79. Это примерно соответствует $V_{\min} = 0,19$ и $V_{\max} = 0,36$ при среднем значении $\bar{V} \approx 0,28$ (табл. 2, строка 9, где нижними индексами от 1 до 11 обозначены различные источники [16]).

Таблица 2

Стохастические параметры глубин карбонизации бетона x для составов бетонной смеси марки П1, приведенных в [16, табл. 3, 4]

Stochastic parameters of concrete carbonization depth x for composition of concrete mixture grade П1, shown in [16, Tab. 3, 4]

Показатель	Значение показателя при В/Ц				
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Предел изменения глубины карбонизации бетона	$\frac{17,0}{7,5}$	$\frac{26,0}{8,8}$	$\frac{33,2}{12,0}$	$\frac{38,0}{14,2}$	$\frac{54,0}{19,2}$
Коэффициент вариации при $P(x)$: 0,95 0,90	0,24 0,31	0,30 0,39	0,29 0,37	0,28 0,36	0,29 0,38
	Отношение измеренного верхнего предела глубины карбонизации бетона к расчету	2,02	2,57	2,44	2,26
Предел изменения относительной глубины карбонизации бетона	$\frac{0,72}{0,33}$	$\frac{0,94}{0,68}$	1,0	$\frac{1,25}{1,12}$	$\frac{1,63}{1,25}$
Коэффициент вариации при $P(x)$: 0,95 0,90	0,23 0,30	0,17 0,22	– –	0,04 0,05	0,08 0,10
	Отношение $x_{\max}^{\text{отн}}$ при В/Ц = 0,6 к $x_{\min}^{\text{отн}}$ при В/Ц = 0,4 по данным различных исследований	$\frac{2,23_1}{2,70_6}$ $\frac{2,83_{11}}$	$\frac{2,11_2}{3,51_7}$	$\frac{2,39_3}{1,86_8}$	$\frac{2,14_4}{2,90_9}$
Коэффициент вариации при $P(x) = 0,95$	$\frac{0,23_1}{0,28_6}$ $\frac{0,29_{11}}$	$\frac{0,22_2}{0,34_7}$	$\frac{0,25_3}{0,19_8}$	$\frac{0,22_4}{0,30_9}$	$\frac{0,36_5}{0,34_{10}}$

При использовании только экспериментальных данных НИИЖБ (варианты 1, 2, табл. 2, строка 1) максимальная величина коэффициента вариации $V_{\max} \approx 0,40$, а при использовании относительных величин глубин карбонизации бетона по четырем вариантам НИИЖБ $V_{\max} \approx 0,38$. Учитывая возможные погрешности экспериментального определения глубин карбонизации бетона и стохастические в виде доверительного интервала для теоретического коэффициента вариации V_T [17, с. 125–126] при $n > 10$ –12, реальные величины V могут значительно отличаться от расчетных, что может увеличить V на 20–30 % при $n > 15$.

Анализируя приведенные величины коэффициентов вариации (табл. 2), необходимо отметить работу В. П. Чиркова [18], который показал, что «вопрос способности конструкции сопротивляться внешним воздействиям в течение срока ее службы с обеспечением требуемых эксплуатационных качеств может быть решен только на основе применения вероятностных подходов, лежащих в основе фундаментальных законов природы». Особенно интересны средние данные, приведенные в [18, с. 112, табл. 8], которые характеризуют величины коэффициентов ва-

риации конструкций (плит покрытия), эксплуатируемых в средах с различной степенью агрессивности (по признаку карбонизации бетона). Так, воздействие всех факторов на карбонизацию бетона оценивается $V = 0,1$ –0,3, а для толщины защитного слоя $V = 0,17$. Тогда с вероятностью 95 % предельные величины V_{\max} при влиянии всех факторов и слабой степени агрессивности могут составлять $V_{\max} \approx 1,96\bar{V} \approx 1,96 \cdot (0,1 - 0,25) \approx 0,20$ –0,49, а для защитного слоя $V_{\max} = 1,96 \cdot 0,17 = 0,33$. Как отмечено в [18, с. 93], фактические сроки службы железобетонных конструкций, эксплуатируемых примерно в одинаковых условиях, различаются в 3–6 раз, что соответствует $V = 0,30$ –0,44. Реальные средние значения могут составлять $\bar{V} \approx 0,35$ –0,40, но с помощью расчета состава бетона [14, 15] их можно снизить до $V = 0,25$ –0,30, т. е. примерно на 30 %, даже для конструкций при средней степени агрессивности окружающей среды.

Еще одно направление для определения величины коэффициента вариации приведено в [19, с. 48]. Для малых выборок ($n < 30$ –50) верхний предел истинного значения дисперсии σ^2

при определенном уровне значимости определяется по формуле

$$\varphi = \frac{n_1}{\chi^2} \sigma^2, \quad (4)$$

где σ^2 – значение дисперсии, подсчитанное по выборке с n_1 степенями свободы при $n_1 = n - 1$; χ^2 – критерий хи-квадрат [19, с. 49].

Следовательно, коэффициент вариации с учетом (4)

$$V_1 = \frac{\sqrt{\varphi}}{x} = \frac{\sigma}{x} \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2}} = V \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2}}. \quad (5)$$

При $V = 0,26$ и $n = 17$ для $P(x) = 0,95$ и $\chi^2 = 7,96$ [19, с. 207, табл. II] получаем $V_{1\max} = 0,26 \cdot \sqrt{2,01} \approx 0,37$, что примерно в 1,4 раза больше V . Для $P(x) = 0,05$ и $\chi^2 = 26,3$ получаем $V_{1\min} \approx 0,20$.

Аналогичный подход использован для оценки надежности определения значений физических свойств строительных материалов и изделий [20] и необходимого количества измерений при их определении [21].

Следует отметить, что большинство описанных выше исследований проведено на базе данных о долговечности бетонных и железобетонных элементов автодорожных мостов, срок службы которых обратно пропорционален интенсивности воздействия подвижной нагрузки [18, с. 102]. Поэтому интенсивность коррозии и износа строительных элементов и конструкций жилых домов, а также величины скорости карбонизации бетона и коэффициентов вариации должны быть несколько меньше. По некоторым данным обследований 40–60-летних жилых домов в плитах балконов и лоджий, изготовленных из бетона классов С12/15–С16/20, величина карбонизированного слоя достигала 20–25 мм [22]. В железобетонных панелях, плитах и колоннах карбонизация не превышала 5–7 мм. Поэтому следует ожидать уменьшения коэффициента вариации отклонений расчетных данных от фактических для жилых зданий по сравнению с $V = 26\%$ для автодорожных мостов [15].

Опубликованная в 2016 г. статья В. В. Бабицкого [23] позволяет надеяться на существенное уменьшение V_{\max} при использовании показателя водонепроницаемости бетона в качестве основ-

ного фактора, определяющего долговечность бетона класса С20/25 при расходе цемента марок М400–М600 в пределах 250–650 кг/м³, водоцементном отношении В/Ц = 0,41–0,72, морозостойкости F50–F500 и водонепроницаемости от W2 до W12.

Стохастический анализ долговечности такого бетона при толщине его защитного слоя $a = 25$ мм и условиях эксплуатации ХС1, произведенный по графической зависимости и представленный в [23, рис. 5] в объеме более 100 точек, показал, что коэффициенты вариации V в каждой группе точек имеют различные значения (рис. 3). Зависимость $V = f(t)$ при $t = 19$ –104 года хорошо аппроксимируется выражением

$$V = \alpha_0 + \alpha_i \exp(-\beta_i t), \quad (6)$$

где α_0 , α_i , β_i – эмпирические константы, определяемые опытным путем.

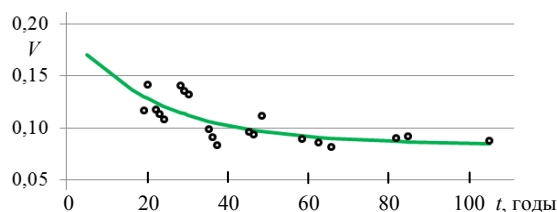


Рис. 3. Зависимость коэффициентов вариации расчетных значений долговечности железобетона по водонепроницаемости бетона по графическим данным [23]

Fig. 3. Dependence of variation coefficients for calculated values on longevity of reinforced concrete with reference to concrete water impermeability according to graphical data [23]

Полученные расчетным путем величины V (рис. 3) существенно меньше приведенных ранее и при $P(x) = 0,95$ предусматривают $t_{\min} = (1 - \alpha V) \bar{t}$, что для $V \approx 0,10$ –0,15 составляет около $(0,7 - 0,8) \bar{t}$. Но при этом погрешности определения среднего времени допустимой глубины карбонизации бетона \bar{t} остаются неизвестными. Для различных элементов жилых домов в условиях г. Минска, по некоторым ограниченному данным, глубины карбонизации бетона за 40–50 лет составляют: плит и стен лоджий и балконов 6–25 мм (при $P = 0,95$, $V \approx 0,37$); плит и колонн подвалов 2–7 мм ($P = 0,95$, $V \approx 0,34$); наружных и внутренних панельных стен и колонн

этажей 2–6 мм ($P = 0,95$, $V \approx 0,3$), что по величинам коэффициентов вариации V соответствует приведенным ранее. Как следует из этих данных, при толщине защитного слоя бетона в железобетонных конструкциях 25 мм в условиях Минска срок службы плит и стен лоджий (балконов) составляет до 50 лет, плит и колонн подвалов, а также наружных и внутренних панельных стен и колонн этажей – не менее 150 лет.

Как показал корреляционный анализ значений $V = f(t)$, приведенных на рис. 3 (сплошная линия по 20 точкам), значение индекса корреляции $\rho = 0,742$, а эмпирические константы составляют: $\alpha_0 \approx 0,084$, $\alpha_i \approx 0,108$ и $\beta_i \approx 0,045$ (1/год).

Необходимо отметить вероятностный подход к оценке глубины (толщины) нейтрализации защитного слоя бетона, рекомендуемый С. Н. Алексеевым [24, с. 283–285]. Здесь в табл. 10.10 представлены результаты измерений ($n \approx 100$) глубин карбонизации бетона в железобетонных плитах для животноводческих зданий, эксплуатируемых 8 и 18 лет. В соответствии с этими результатами коэффициенты вариации V глубин нейтрализации бетона составили примерно 0,17 и 0,16 при хорошем совпадении плотностей распределения значений с законом Гаусса [24, рис. 10.14].

В [25, с. 53, табл. 1.5, 1.6,] приведены некоторые обобщенные результаты исследований скоростей карбонизации (v , мм/год) защитных слоев бетона, по которым можно рассчитать 17 значений коэффициентов вариации V этого параметра. Возможный разброс значений V для различных бетонов и условий их применения располагается ориентировочно в пределах 0,1–0,4 и соответствует приведенному выше диапазону V для глубин карбонизации. При этом, по данным В. П. Чиркова, за срок службы от 10 до 50 лет величина V уменьшается с 0,20 до 0,13, т. е. примерно в 1,5 раза. По математической модели в умеренном климате V для скоростей карбонизации остается примерно постоянным. В остальных случаях наблюдается весьма существенный разброс значений V .

Следует отметить, что приведенный в статье анализ экспериментальных данных является достаточно приближенным вследствие отсутствия многих показателей точности и надежности использованных результатов исследований.

Как указывают Д. И. Бородай и А. А. Матюнин [26], по данным практики [24, 27], фактическое значение карбонизации бетона отклоняется от закона корня квадратного в меньшую сторону. Однако в соответствии с данными табл. 1 зависимость $V = f(t)$ может оказаться возрастающей, что свидетельствует о неоднородности влияния времени на карбонизацию приповерхностных слоев бетона. При оценке долговечности строительных элементов и конструкций необходимо учитывать стохастические характеристики [28].

ВЫВОДЫ

1. Коэффициент вариации роста глубины карбонизации бетона является важнейшим показателем долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций.

2. Величины коэффициентов вариации глубин карбонизации бетона от естественных вероятностных причин, по исследованиям различных авторов, при обеспеченности 95 % в обычных условиях могут достигать 25–35 %, что при нормальном распределении плотности вероятности может составлять около половины среднего расчетного времени сохранения защитного слоя бетона и долговечности железобетонного элемента.

3. В настоящее время наиболее перспективным направлением расчета долговечности железобетона является учет водонепроницаемости бетона.

4. Влияние времени на уменьшение защитного слоя бетона, не подверженного карбонизации, а следовательно, и долговечности железобетона, не ограничивается только корнем квадратным из времени, а следует и другим закономерностям.

5. В основе стохастической оценки долговечности строительных материалов, элементов, конструкций и сооружений, как и других физических характеристик, лежат три следующих основных показателя: необходимый уровень надежности в расчетный момент времени; значение уменьшения надежности во время эксплуатации (показатели износа); аналитическая характеристика распределения плотности вероятности случайных значений долговечности в заданный момент времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович, С. Н. Вероятностная модель карбонизации железобетонных конструкций / С. Н. Леонович, О. Ю. Чернякевич // Наука и техника. 2012. № 5. С. 57–64.
2. Янко, Я. Математико-статистические таблицы / Я. Янко; пер. с чешского А. Ф. Маслова; под ред. А. М. Длинна. М.: Госстатиздат, 1961. 243 с.
3. Тур, В. В. Зарубежный опыт нормирования в области оценки технического состояния существующих железобетонных конструкций зданий и сооружений / В. В. Тур, Т. М. Пецольд // Строительная наука и техника. 2006. № 2. С. 32–46.
4. Снежков, Д. Ю. Анализ методик неразрушающих испытаний бетона конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, А. В. Вознищук // Наука и техника. 2013. № 2. С. 33–39.
5. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия: СТБ 1544–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 20 с.
6. Хастингс, Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс; пер. с англ. А. К. Звонкина. М.: Статистика, 1980. 95 с.
7. Шалый, Е. Е. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений Хабаровского края / Е. Е. Шалый, Л. В. Ким, С. Н. Леонович // Инновации в бетоне, строительстве, строительном производстве и подготовке инженерных кадров: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, 9–10 июня 2016 г.: в 2 ч. Минск, 2016. Ч. 1. С. 243–247.
8. Леонович, С. Н. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при карбонизации / С. Н. Леонович, О. Ю. Чернякевич // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 28–31.
9. Анализ срока службы современных цементных бетонов / П. Б. Рапорт [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 92–100.
10. Чернякевич, О. Ю. Расчет срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации / О. Ю. Чернякевич, С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве: сб. науч. статей. Гродно: ГрГУ, 2010. С. 369–375.
11. Пастушков, В. Г. Напряженно-деформированное состояние и долговечность конструкции проезжей части транспортных сооружений / В. Г. Пастушков. Минск, 2007. 21 с.
12. Васильев, А. И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов в условиях коррозии арматуры / А. И. Васильев // Бетон и железобетон. 2003. № 2. С. 17–20.
13. Васильев, А. И. Оценка грузоподъемности и долговечности мостов. Методическое пособие / А. И. Васильев. М.: МАДИ, 2016. 38 с.
14. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона / В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. 2005. № 2. С. 33–38.
15. Голшани, М. Прогнозирование глубины карбонизации бетона железобетонных мостовых конструкций / М. Голшани, В. В. Бабицкий, О. М. Вайтович // Строительная наука и техника. 2011. № 3. С. 13–16.
16. Голшани, М. Влияние структурных особенностей бетона на глубину его карбонизации / М. Голшани, М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. 2011. № 6. С. 21–25.
17. Глушко, В. Т. Оценка напряженно-деформированного состояния массивов горных пород / В. Т. Глушко, С. П. Гавеля. М.: Недра, 1986. 222 с.
18. Чирков, В. А. Надежность и долговечность строительных конструкций / В. А. Чирков // Российская архитектурно-строительная энциклопедия (РАСЭ-В). М., 1999. Ч. V. С. 86–117.
19. Браунли, К. А. Статистические исследования в производстве / К. А. Браунли, пер. с англ. В. А. Говоркова; под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. 228 с.
20. Осипов, С. Н. Об оценке надежности результатов испытаний физических свойств строительных материалов / С. Н. Осипов // Наука и техника. 2014. № 5. С. 18–24.
21. Способ определения минимального количества испытаний преимущественно строительных материалов и изделий: Евразийский пат. № 014390 / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко. Опубл. 29.10.2010.
22. Отчеты о результатах обследований технического состояния строительных конструкций жилых домов 60–80-х гг. постройки // ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.». Минск, 2014–2016 гг.
23. Бабицкий, В. В. Прочность бетона и глубина его карбонизации / В. В. Бабицкий // Инновации в бетоне, строительстве, строительном производстве и подготовке инженерных кадров: сб. статей по материалам Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016 г.: в 2 ч. / БНТУ; редкол.: Э. И. Бятовский, В. В. Бабицкий. Минск, 2016. Ч. 1. С. 22–27.
24. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]. М.: Стройиздат, 1990. 313 с.
25. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных коррозионных воздействиях: в 2 т. / С. Н. Леонович [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. Т. 2. 203 с.
26. Бородай, О. И. Прогноз сроков карбонизации бетона защитного слоя железобетонных элементов автодорожных мостов / О. И. Бородай, А. А. Матюнин // Вестник Донецкой национальной академии строительства и архитектуры. 2009. Т. 75, № 1. С. 147–151.
27. Lay, S. Lifecon Deliverable D3.2 – Instructions on Methodology and Application of Models for the Prediction of the Residual Service Life for Classified Environmental Loads and Types of Structures in Europe / S. Lay, P. Scheiß, J. Cairns. European Community, 2003. 169 p.
28. Осипов, С. Н. Влияние стохастических характеристик свойств материалов, изделий и процессов на оценку нормативных параметров / С. Н. Осипов // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 4. С. 304–314. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-304-314>.

Поступила 11.05.2018

Подписана в печать 07.08.2018

Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. Leonovich S. N., Cherniakov O. Yu. (2012) Probability Model for Carbonization of Reinforced Concrete Structures. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 57–64 (in Russian).
2. Yanko Ya. (1961) *Mathematical-Statistical Tables*. Moscow, Gosstatizdat Publ. 243 (in Russian).
3. Tur V. V., Petsold T. M. (2006) International Experience on Rate Setting in the Field of Assessment of Technical Condition of Existing Reinforced Concrete Structures, Buildings and Facilities. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (2), 32–46 (in Russian).

4. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N., Voznishchik A. V. (2013) Analysis of Methodologies for Non-Destructive Tests of Concrete Structures in Accordance with Existing State Standards and Norms of European Union. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 33–39 (in Russian).
5. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1544–2005. *Heavy-Duty Structural Concrete. Technical Specifications*. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2005. 20 (in Russian).
6. Hastings N. A. J., Peacock J. B. (1975) *Statistical Distributions: a Handbook for Students and Practitioners*. Wiley. 130.
7. Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N. (2016) Probability Calculation of Depth and Distribution of Carbonization Front in Concrete of Hydraulic Engineering Structures on the Khabarovsk Territory. *Innovatsii v Betonovedenii, Stroitel'nom Proizvodstve i Podgotovke Inzhenerykh Kadrov: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posvyashch. 100-Letiya so Dnya Rozhdeniya I. N. Akhverdova i S. S. Ataeva, 9–10 Iyunya 2016 g. Ch. 1* [Innovations in Concrete Knowledge, Construction Operations and Training of Engineering Personnel: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to 100th Anniversary of the Birthday of I. N. Akhverdov and S. S. Ataev, June 9–10, 2016. Part 1]. Minsk, 243–247 (in Russian).
8. Leonovich S. N., Chernyakevich O. Yu. (2013) Forecasting of Longevity for Reinforced Concrete Structures During Carbonization. *Stroitelnye Materialy = Construction Materials*, (2), 28–31 (in Russian).
9. Rapoport P. B., Rapoport N. V., Polyanskii V. G., Sokolova E. R., Garibov R. B., Kochetkov A. V., Yankovskii L. V. (2012) Analysis of Service Life for Modern Cement Concrete. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (4), 92–100 (in Russian).
10. Chernyakevich O. Yu., Leonovich S. N. (2010) Calculation of Service Life for Reinforced Concrete Structures under Conditions of Carbonization Corrosion. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve: Sb. Nauch. Statei* [Prospects for Development of New Technologies in Construction: Collection of Scientific Articles]. Grodno, State University of Grodno, 369–375 (in Russian).
11. Pastushkov V. G. (2007) *Stress and Strain State and Longevity of Structures in Traffic Area of Transport Infrastructure Facilities*. Minsk. 21 (in Russian).
12. Vasiliev A. I. (2003) Probabilistic Assessment of Service Life for Operated Automobile Road Bridges under Conditions of Reinforcement Corrosion. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (2), 17–20 (in Russian).
13. Vasiliev A. I. (2016) *Assessment of Bridge Load Capacity and Longevity*. Moscow, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. 38 (in Russian).
14. Babitsky V. V. (2005) Structure and Corrosion Resistance of Concrete and Reinforced Concrete. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (2), 33–38 (in Russian).
15. Golshani M., Babitsky V. V., Vaytovich O. M. (2011) Forecasting of Concrete Carbonization Depth in Reinforced Concrete Bridge Structures. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (3), 13–16 (in Russian).
16. Golshani M., Bibik M. S., Babitsky V. V. (2011) Influence of Structural Concrete Peculiarities on Depth of its Carbonization. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (6), 21–25 (in Russian).
17. Glushko V. T., Gavelya S. P. (1986) *Assessment of Stress and Strain State of Rock Massives*. Moscow, Nedra Publ. 222 (in Russian).
18. Chirkov V. A. (1999) Reliability and Longevity of Construction Structures. *Russian Architectural and Construction Encyclopedia (RACE-V). Part V*. Moscow, 86–117 (in Russian).
19. Brownlee K. A. (1949) *Statistical Investigations in Industry*. Moscow, Inostrannaya Literatura. 228 (in Russian).
20. Osipov S. N. (2014) On Reliability Evaluation of Test Results for Physical Properties of Construction Materials. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 18–24 (in Russian).
21. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2010) *Method for Determination of Minimum Number of Testings for Preferably Construction Materials and Products*. Eurasian Patent No 014390 (in Russian).
22. State Enterprise “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S. (2014–2016) *Reports on Investigation Results of Technical State for Construction Structures of Residential Buildings Being Constructed in 60–80-ies*. Minsk (in Russian).
23. Babitsky V. V. (2016) Strength of Concrete and Depth of its Carbonization. *Innovatsii v Betonovedenii, Stroitel'nom Proizvodstve i Podgotovke Inzhenerykh Kadrov: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posvyashch. 100-Letiya so Dnya Rozhdeniya I. N. Akhverdova i S. S. Ataeva, 9–10 Iyunya 2016 g. Ch. 1* [Innovations in Concrete Knowledge, Construction Operations and Training of Engineering Personnel: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to 100th Anniversary of the Birthday of I. N. Akhverdov and S. S. Ataev, June 9–10, 2016. Part 1]. Minsk, 22–27 (in Russian).
24. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Shissl' P. (1990) *Longevity of Reinforced Concrete in Aggressive Environment*. Moscow, Stroyizdat Publ. 313 (in Russian).
25. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. (2016) *Strength, Crack-Resistance and Longevity of Constructional Concrete at Temperature Corrosion Impacts. Vol. 2*. Minsk, Belarusian National Technical University Publishing House. 203 (in Russian).
26. Boroday O. I., Matyunin A. A. (2009) Forecasting of Terms for Carbonization of Concrete Protective Layer in Reinforced Concrete Elements of Automobile Road Bridges. *Vestnik Donetskoj Natsional'noi Akademii Stroitel'stva i Arkhitektury = Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 75 (1), 147–151 (in Russian).
27. LIFECON. *Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability*. State of the Art Report. Deliverable D3.2, Project G1RD-CT-2000-00378, 2003. Available at: <http://lifecon.vtt.fi/d32.pdf>.
28. Osipov S. N. (2017) Influence of Stochastic Characteristics for Properties of Materials, Products and Processes on Evaluation of Regulatory Parameters. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (4), 304–314. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-304-314> (in Russian).

Received: 11.05.2018

Accepted: 07.08.2018

Published online: 29.05.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257>

УДК 626/627.8

Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений

Кандидаты техн. наук, доценты Г. Г. Круглов¹⁾, Н. Н. Линкевич¹⁾,
О. В. Немеровец¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Бетонные плотины, входящие в состав речных гидроузлов, сопрягаются с земляными сооружениями или с берегами с помощью береговых устоев. Если грунт берега или земляной плотины водопроницаем, то в зоне примыкания возникает фильтрация воды вокруг берегового устоя. Расчет фильтрации в обход берегового устоя при заданных отметках уровней воды в верхнем и нижнем бьефах выполняется с целью построения опоясывающей устой кривой депрессии и определения градиента фильтрационного потока, контролирующего фильтрационную прочность грунта за устоем. Теоретических решений эта задача не имеет ввиду ее сложности, для отдельных расчетных схем разработаны приближенные методы расчета. Для случая, когда грунт за береговым устоем однородный и изотропный, приток грунтовых вод со стороны берега отсутствует или незначительный (им можно пренебречь), а береговой устой располагается на водоупоре, предложены приближенные методы В. П. Недриги и Р. Р. Чугаева. Опыт обследования ряда белорусских гидроузлов показал, что отсутствие обоснованного расчетами прогноза положения уровней грунтовых вод за устьем ведет к снижению прочности и устойчивости берегового устоя и к возможному его разрушению. В лабораторных условиях выполнена экспериментальная проверка разработанного Р. Р. Чугаевым приближенного метода расчета фильтрации в обход берегового устоя. По результатам опыта построена опоясывающая устой кривая депрессии, которая показала хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных, что позволяет использовать этот метод для обоснованного проектирования конструкций береговых устоев, обеспечивающих их надежную эксплуатацию.

Ключевые слова: бетонные сооружения, земляная плотина, берег, береговой устой, обходная фильтрация, кривая депрессии, контролирующий градиент

Для цитирования: Круглов, Г. Г. Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич, О. В. Немеровец // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 252–257. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257>

Filtration Bypassing Retaining Hydraulic Structures

G. G. Kruglov¹⁾, N. N. Linkevich¹⁾, O. V. Nemerovets¹⁾

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

Abstract. Concrete dams that are part of river waterworks are integrated with earthworks or with banks using coastal abutments. If the soil of cost or earthen dam is permeable, then in the zone of contiguity water filtration occurs around the coastal abutment. Calculation of filtration bypassing the coastal abutment at specified water levels in the upper and lower pools is performed with the aim of constructing an encircling curve of depression and determining a gradient of filtration flow that controls the filtration strength of the soil beyond the abutment. This problem has no theoretical solutions – in view of its complexity, approximate calculation methods have been developed for individual calculation schemes. For the case when the soil behind the coastal abutment is homogeneous and isotropic, groundwater inflow from the coast is absent or insignificant and can

Адрес для переписки

Круглов Георгий Георгиевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 268-84-50
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kruglov Georgiy G.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 268-84-50
hidrokaf@bntu.by

be neglected, and the coastal abutment is located on a water bed and approximate methods by V. P. Nedrigi and R. R. Chugaeva are proposed in the paper. The experience of surveying a number of Belarusian hydropower stations has shown that the absence of a justified prediction pertaining to the position of groundwater levels beyond the estuary leads to a decrease in the strength and stability of the coastal abutment and its possible destruction. An experimental verification of the approximate method for calculation filtration bypassing the coastal abutment developed by R. R. Chugaev has been carried out in laboratory conditions. According to the obtained experience a depression curve encircling the abutment has been constructed which show good agreement between experimental and calculated data that allows to use this method for reasonable design of coastal abutment structures ensuring their reliable operation.

Keywords: concrete structures, earth dam, coast, abutment, bypass filtration, depression curve, controlling gradient

For citation: Kruglov G. G., Linkevich N. N., Nemerovets O. V. (2020) Filtration Bypassing Retaining Hydraulic Structures. *Science and Technique*. 19 (3), 252–257. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257> (in Russian)

Введение

В состав любого речного подпорного гидроузла в Республике Беларусь входят: земляная плотина, бетонные водосбросные и водозаборные сооружения, здания ГЭС и др. Сопряжение бетонных сооружений с земляной плотиной или берегом осуществляется с помощью береговых устоев. Береговые устои предназначены для защиты земляной плотины или берега от действия воды, сливающейся через водосбросы, для направления ее в водосбросное отверстие и обеспечения плавного ее растекания в нижнем бьефе, а также для предотвращения опасного воздействия фильтрационного потока, идущего в обход бетонных сооружений в зоне примыкания их к берегу или земляной плотине.

Береговой устой состоит из трех основных элементов [1]: вертикальной продольной стенки, верхового и низового сопрягающих открылков (рис. 1).

Под действием напора (разности уровней в верхнем и нижнем бьефах гидроузла) происходит фильтрация воды через земляную плотину, в грунте основания под бетонными сооружениями и в обход их, вокруг береговых устоев. Расчет фильтрации в обход берегового устоя при заданных отметках уровней воды в верхнем и нижнем бьефах выполняется с целью:

- построения опоясывающей устой кривой депрессии, знание которой необходимо для проверки устойчивости и прочности открылков береговых устоев;

- определения градиента фильтрационного потока, по величине которого проверяется фильтрационная прочность (отсутствие фильтрационных деформаций) грунта за устоем.

Как показало изучение проектной документации ряда белорусских гидроузлов, запроектированных и возведенных в середине прошлого века (гидроузел Заславского водохранилища на р. Свислочь (Минское море), гидроузлы Тетеринской ГЭС на р. Друть и Клястицкой ГЭС на р. Нища), расчеты обходной фильтрации не выполнялись. Произведенные в 2013–2018 гг. натурные обследования этих гидроузлов выявили наличие достаточно серьезных проблем, связанных с обходной фильтрацией.

На Заславском водохранилище на низовом открылке правобережного берегового устоя (рис. 2) имеются многочисленные белые пятна выщелоченного бетона, потемнение и подтеки воды, что свидетельствует о постоянном высоком стоянии кривой депрессии за устоем [2, 3]. Причиной могут быть достаточно короткий путь фильтрационного потока вокруг устоя, отсутствие противофильтрационного устройства в зоне примыкания устоя к земляной плотине. Кроме того, обратная засыпка пазух устоя со стороны верхнего бьефа выполнена суглинком, а со стороны нижнего бьефа – песком. Суглинок при замерзании и оттаивании пучинится, в нем появляются трещины. Разуплотнение грунта на контакте с тыловой гранью устоя могло произойти также вследствие осадок и деформаций устоя. Все это привело к усиленной фильтрации вдоль берегового устоя и к высокому стоянию уровней грунтовых вод за устоем.

В процессе натурных обследований выполнены исследования прочности бетонных конструкций берегового устоя неразрушающим методом с помощью измерителя прочности бетона ИПС-МГ4.03 [4].

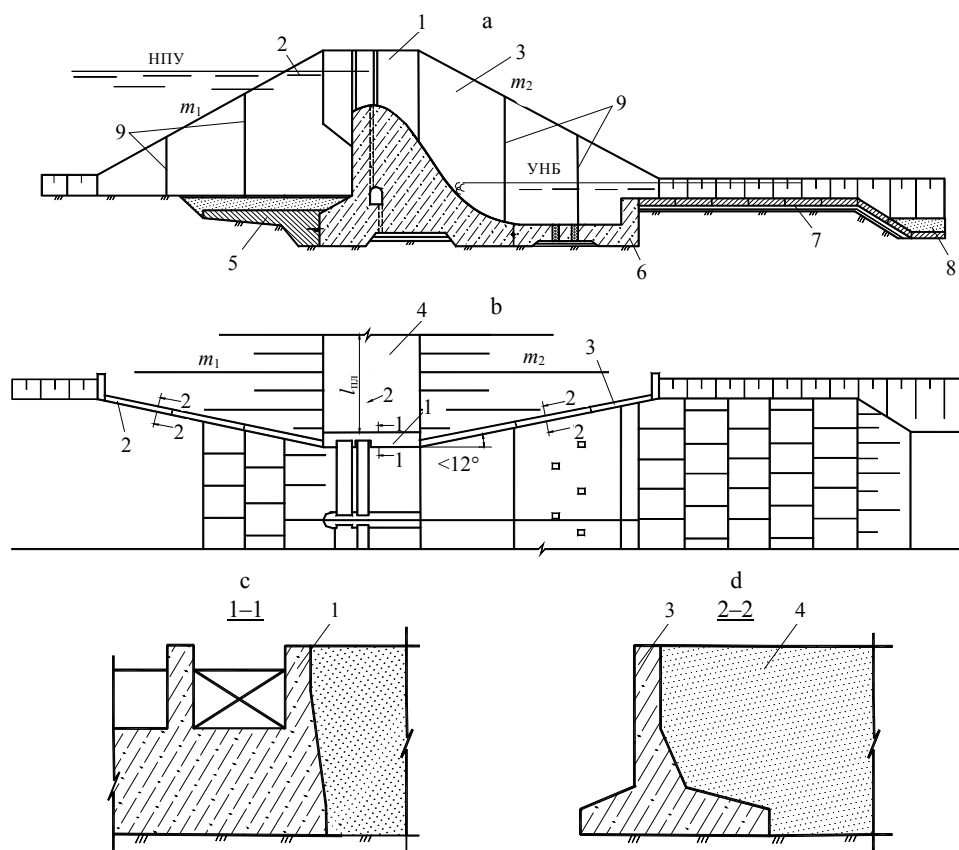


Рис. 1. Конструкция берегового устоя: а, с, d – поперечный разрез по водосливной плотине, по вертикальной продольной стенке и по сопрягающим открылкам; б – план; 1 – вертикальная продольная стенка; 2, 3 – верхней и нижней сопрягающие открылки; 4 – земляная плотина; 5 – понур; 6 – водобой; 7 – рисберма; 8 – ковш; 9 – конструктивные швы

Fig. 1. Design of coastal abutment: a, c, d – cross-section along spillway dam, along vertical longitudinal wall and along mating abutment walls; b – plan; 1 – vertical longitudinal wall; 2, 3 – upstream and bottom wing walls; 4 – earthen dam; 5 – upstream floor; 6 – apron; 7 – downstream apron; 8 – bucket; 9 – structural joints



Рис. 2. Подтеки на низовом открылке правобережного устоя

Fig. 2. Smudges on lower wing wall of right bank abutment

В десяти точках низового открылка правобережного устоя произведены измерения прочности бетона, которые показали, что в двух точках его прочность составляла 10,1 и 10,9 МПа, что соответствовало марке бетона М150, а в оставшихся восьми точках – 4,3–6,5 МПа (М35–М50). Как видно, высокий уровень грунтовых вод за устоем вызывает фильтрацию воды через бетон открылка, выщелачивание бетона и снижение его прочности до значений,

существенно меньших минимально допустимых, которые для подпорных гидротехнических сооружений соответствуют марке М200.

Проведенные в 2008 г. ремонтные работы по штукатурке лицевой поверхности открылка необходимого эффекта не дали, так как не была устранена причина (обходная фильтрация и плохая гидроизоляция тыловой грани устоя), вызывающая выщелачивание бетона и его разрушение.

На Тетеринской ГЭС на низовом открылке левобережного устоя под действием фильтрационного потока, идущего в обход устоя, образовалось отверстие в бетоне (рис. 3) [5]. Была предпринята попытка установить арматурную сетку и забетонировать отверстие, что также не дало положительного результата (не устранена причина разрушения). С течением времени бетон, которым заделали отверстие, разрушился, арматурные сетки оголились, и фильтрационный поток выходит через отверстие на левый берег нижнего бьефа.



Рис. 3. Разрушение низового открылка левобережного устоя Тетеринской ГЭС

Fig. 3. Destruction of lower wing wall of left bank abutment at Teterinskaya hydroelectric power plant

В неудовлетворительном состоянии находится и низовой открылок правобережного устоя Клястицкой ГЭС (рис. 4), где также происходят выщелачивание бетона, разрушение и отслаивание штукатурки.



Рис. 4. Низовой открылок правобережного устоя Клястицкой ГЭС

Fig. 4. Lower wing wall of right bank abutment at Klyastitskaya hydroelectric power plant

Таким образом, данные натурных обследований указывают на необходимость выполнения расчетов обходной фильтрации при проектировании и конструктивных мероприятий понижающих уровней грунтовых вод за устоем, уменьшающих градиент фильтрационного потока.

Теоретических решений эта задача не имеет ввиду ее сложности, для отдельных расчетных схем разработаны приближенные методы расчета. Для случая, когда грунт за береговым устоем однородный и изотропный, приток грунтовых вод со стороны берега отсутствует или он незначительный (им можно пренебречь), а береговой устой располагается на водоупоре, предложены приближенные методы В. П. Недриги [6], Р. Р. Чугаева [7], Г. Г. Круглова [8].

Метод В. П. Недриги основан на приведении берегового устоя к фрагментам определенного очертания и получении зависимости для построения опоясывающей этот фрагмент кривой депрессии. Данный метод не нашел широкого применения, так как конструкцию реального берегового устоя привести к имеющимся схемам фрагментов не всегда возможно.

Согласно методу Р. Р. Чугаева, береговой устой заменяется фиктивным (воображаемым) подземным контуром такого же очертания, как и устой, рассчитываемый по методу коэффициентов сопротивления, разработанному Р. Р. Чугаевым для расчета напорной фильтрации под сооружением. При этом наклонные откосы грунтового массива за устоем (берега или земляной плотины) в верхнем и нижнем бьефах, к которым примыкает устой, заменяются вертикальными откосами, доходящими до расчетного водоупора и отстающими от урезов воды на откосах на расстоянии: в верхнем бьефе $a_1 = 0,4h_1$, в нижнем $a_2 = 0,4h_2$ (где h_1, h_2 – глубина воды в верхнем и нижнем бьефах). Принимается условие, что воображаемый подземный контур располагается на водопроницаемом основании бесконечной мощности, т. е. $T_d = \infty$. На этот контур действует напор H , равный разности уровней воды в верхнем и нижнем бьефах плотины [9, 10].

В результате расчета подземного контура определяется контролирующий градиент фильтрационного потока и строится эпюра фильтрационного давления на фиктивный подземный контур. На эпюре фильтрационного давления выбираются пять-шесть ординат в разных точках контура ($h_1^H, h_2^H, \dots, h_i^H$) и вычисляются ординаты h_i^6 опоясывающей устой кривой депрессии по зависимости

$$h_i^6 = \sqrt{(h_1 + h_2)h_i^H + h_2^2}.$$

Фильтрационная прочность грунта за береговым устоем проверяется по условию

$$J_k < J_{\text{доп}},$$

где $J_{\text{доп}}$ – допустимый градиент фильтрационного потока, определяемый по [11] в зависимости от грунта за устоем и класса сооружения; J_k – контролирующий градиент, $J_k = \frac{H}{\sum \xi T_p}$; $\sum \xi$ – суммарный коэффициент сопротивления подземного контура; T_p – расстояние до расчетного водоупора.

Опытная проверка этого метода расчета проводилась в лаборатории гидротехнических сооружений кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ на лабораторной установке, оборудованной в грунтовом лотке длиной 202 см, шириной 65 см и высотой 40 см (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид лабораторной установки
Fig. 5. General view of laboratory plant

Модель берегового устоя, состоящая из вертикальной продольной стенки, верхового и низового отсыпков и противофильтрационной диафрагмы, выполненная из дерева, примыкает к берегу, отсыпанному из песка средней крупности. Водоупором является дно лотка, на котором стоит устой. Вдоль берегового устоя размещаются семь пьезометров, первый и седьмой из которых фиксируют глубину воды

в верхнем и нижнем бьефах, а второй–шестой – ординаты опоясывающей кривой депрессии. Пьезометры резиновыми трубами выведены на щиток, закрепленный на стенке лотка. В верхнем и нижнем бьефах берегового устоя оборудованы водосливные воронки, поддерживающие постоянные уровни воды в бьефах.

Вода в верхний бьеф устоя подавалась из водопровода за 2–3 ч до начала опыта. При установившемся режиме фильтрации снимались показания пьезометров, по ним строилась опытная опоясывающая кривая депрессии, а также вычисленная по вышеприведенному методу.

Как видно из табл. 1 и рис. 6, вычисленные ординаты опоясывающей устоя кривой депрессии практически совпадают с их опытными значениями, что позволяет использовать приближенный метод расчета Р. Р. Чугаева для прогнозирования положения уровней грунтовых вод за береговым устоем и принимать при необходимости обоснованные конструктивные мероприятия по их снижению, избегая тем самым непредвиденных проблем, вызванных фильтрацией грунтовых вод вокруг береговых устоев.

Таблица 1

Ординаты опоясывающей устоя кривой депрессии
Ordinates of depression curve encircling abutment

Кривая депрессии	Ордината кривой депрессии в пьезометре						
	1 (верхний бьеф)	2	3	4	5	6	7 (нижний бьеф)
Опытная	25,3	21,4	17	16,93	16,37	14,6	8,8
Вычисленная	25,3	21,15	19,28	–	16,27	14,8	8,8

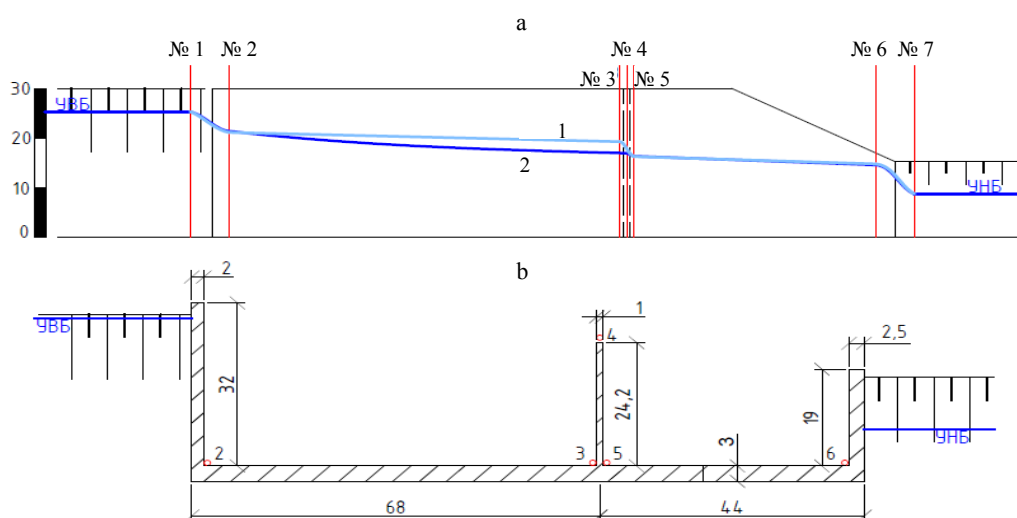


Рис. 6. Вычисленная (1) и опытная (2) опоясывающие устоя кривые депрессии: а – план устоя; б – продольный вид
Fig. 6. Calculated (1) and experimental (2) depression curves encircling abutment: а – abutment plan; б – longitudinal view

ВЫВОДЫ

1. При проектировании речных подпорных гидрозлов необходимо производить расчеты фильтрации в обход береговых устоев для определения положения уровней грунтовых вод за устоем и при необходимости их регулирования с помощью обоснованных конструктивных мероприятий.

2. Выполненная экспериментальная проверка разработанного Р. Р. Чугаевым приближенного метода расчета фильтрации в обход берегового устоя показала хорошее совпадение опытных и расчетных данных, что позволяет рекомендовать его использование в практике проектирования речных подпорных гидрозлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богославчик, П. М. Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. Минск: Вышэйш. шк., 2018. 367 с.
2. Исследование технического состояния сооружений гидроузла на водохранилище «Заславское». Минск, 2013. 76 с.
3. Круглов, Г. Г. Результаты натурных обследований гидротехнических сооружений водохранилища «Заславское» и мероприятия по предотвращению их разрушения фильтрационным потоком / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. 2015. Т. 73, № 1. С. 160–165.
4. Линкевич, Н. Н. Эксплуатация гидротехнических сооружений / Н. Н. Линкевич, М. В. Нестеров. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 520 с.
5. Оценка опасности Тетеринского водохранилища на реке Друть Круглянского района Могилевской области / В. В. Ивашечкин [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2017. № 1. С. 62–71.
6. Недрига, В. П. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / В. П. Недрига. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.
7. Чугаев, П. П. Подземный контур гидротехнических сооружений / П. П. Чугаев. Л.: Энергия, 1974. 237 с.
8. Круглов, Г. Г. Гидротехнические сооружения. Лабораторный практикум / Г. Г. Круглов, Ю. А. Медведева. Минск: Вышэйш. шк., 2019. 109 с.
9. Гидротехнические сооружения комплексных гидрозлов / П. М. Богославчик [и др.]; под ред. Г. Г. Круглова. Минск: БНТУ, 2006. 585 с.
10. Богославчик, П. М. Гидротехнические сооружения ТЭС и АЭС / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. Минск: Вышэйш. шк., 2010. 270 с.
11. Плотины из грунтовых материалов. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.04-150–2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2010. 54 с.

Поступила 05.06.2019

Подписана в печать 10.09.2019

Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. Bogoslavchik P. M., Kruglov G. G. (2018) *Design and Calculations of Hydraulic Structures*. Minsk, Vyshayshaya Shkola Publ. 367 (in Russian).
2. *Investigation of Technical Condition of Waterworks Facilities at the Zaslavskoye Reservoir*. Minsk, 2013. 76 (in Russian).
3. Kruglov G. G., Linkevich N. N. (2015) Results of Field Surveys on Hydraulic Structures of the Zaslavskoye Reservoir and Measures to Prevent their Destruction by Filtration Flow. *Melioratsiya* [Melioration], 73 (1), 160–165 (in Russian).
4. Linkevich N. N., Nesterov M. V. (2019) *Operation of Hydraulic Structures*. Minsk, Publishing House of Data Processing Centre of Ministry of Finance. 520 (in Russian).
5. Ivashchkin V. V., Veremenyuk V. V., Kruglov G. G., Linkevich N. N., Murashko O. A., Nedashkovskaya I. V. (2017) Hazard Assessment of the Teterinsky Reservoir on the Drute River of the Kruglyansky District of the Mogilev Region. *Vestnik Universiteta Grazhdanskoj Zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, (1), 62–71 (in Russian).
6. Nedriга V. P. (1983) *Hydraulic Works: Designer's Handbook*. Moscow, Stroyizdat Publ. 543 (in Russian).
7. Chugaev P. P. (1974) *Underground Circuit of Hydraulic Structures*. Leningrad, Energiya Publ. 237 (in Russian).
8. Kruglov G. G., Medvedeva Yu. A. (2019) *Hydrotechnical Structures. Laboratory Practice*. Minsk, Vyshayshaya Shkola Publ. 109 (in Russian).
9. Bogoslavchik P. M., Bogdanovich M. I., Gatillo S. P., Kruglov G. G., Linkevich N. N. (2006) *Hydrotechnical Structures of Complex Waterworks*. Minsk, Belarusian National Technical University. 585 (in Russian).
10. Bogoslavchik P. M., Kruglov G. G. (2010) *Hydraulic Structures of Thermal Power Plants and Nuclear Power Plants*. Minsk, Vyshayshaya Shkola Publ. 270 (in Russian).
11. ТКП 45-3.04-150–2009 (02250) *Dams from Soil Materials. Building Design Standards*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 54 (in Russian).

Received: 05.06.2019

Accepted: 10.09.2019

Published online: 29.05.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-258-266>

УДК 334.024:330.35

Исследование изменения роли ведущих университетов в национальной инновационной экосистеме при переходе к модели «Университет 4.0»

Доктора экон. наук, профессора Т. Г. Максимова¹⁾, Е. Л. Богданова¹⁾,
канд. пед. наук, доц. Г. М. Бровка²⁾

¹⁾Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Статья посвящена выявлению закономерностей деятельности российских университетов в национальной инновационной экосистеме. Решения вопросов развития инновационной активности, эффективной коммерциализации и внедрения научных разработок обосновываются в стратегических документах развития государства. От успешности внедрения научных и опытно-конструкторских разработок в значительной мере зависит уровень инновационной безопасности страны – состояния защищенности национальных интересов государства от внутренних и внешних угроз, возникающих в условиях инновационного развития. На ведущие высшие учебные заведения возлагаются задачи стать центрами региональных инновационных экосистем, превратить университеты в активных участников социально-экономического и инновационного развития. Для выявления закономерностей деятельности учреждений высшего образования в этой сфере использованы официальные статистические данные о деятельности национальных исследовательских университетов Российской Федерации. Анализ изменений проанализированных показателей позволил выделить университеты, реализующие наиболее перспективные, с точки зрения мирового опыта, модели управления научной деятельностью. Это, в первую очередь, университеты, для которых отмечается положительный относительный прирост показателей общего объема НИОКР, доли внебюджетных средств в доходах вузов от НИОКР, удельного веса доходов от НИОКР в общих доходах. Установлено, что современный этап развития университетов характеризуется наличием как конкурентных преимуществ, так и вызовов, формирующих особенности их модернизации. Реакцией на вызовы должно стать создание бизнес-модели деятельности «Университет 4.0», включающей новые технологии, продукты и услуги, востребованные в стране.

Ключевые слова: инновационное региональное развитие, инновационная безопасность, региональная инновационная экосистема, национальные исследовательские университеты, опорные университеты

Для цитирования: Максимова, Т. Г. Исследование изменения роли ведущих университетов в национальной инновационной экосистеме при переходе к модели «Университет 4.0» / Т. Г. Максимова, Е. Л. Богданова, Г. М. Бровка // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 258–266. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-258-266>

Адрес для переписки

Максимова Татьяна Геннадьевна
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
просп. Кронверкский, 49,
197101, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Тел.: +7 921 346-72-39
tgmaximova@itmo.ru

Address for correspondence

Maximova Tatyana G.
ITMO University
49, Kronverksky Ave.,
197101, Saint Petersburg, Russian Federation
Tel.: +7 921 346-72-39
tgmaximova@itmo.ru

Study of Changing Role of Leading Universities in the National Innovation Ecosystem during Transition to the University 4.0 Model

T. G. Maximova¹, E. L. Bogdanova¹, G. M. Brovka²

¹ITMO University (Saint Petersburg, Russian Federation),

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

Abstract. The paper is devoted to identifying patterns of activity of Russian universities in the national innovation ecosystem. Decisions on the development of innovative activity, effective commercialization and implementation of scientific developments are substantiated in strategic documents of state development. In fact the level of innovative security of a country, the state of protection of national interests of the state from internal and external threats arising from the conditions of innovative development, depends to a large extent on the success of the implementation of scientific and development projects. The leading higher education institutions are entrusted with the task of becoming centers of regional innovation ecosystems, transforming universities into active participants of socio-economic and innovative development. Official statistics on national research universities of the Russian Federation have been used in order to identify patterns of the activity of higher education institutions in this area. An analysis of the changes in the analyzed indicators has made it possible to single out universities that implement the most promising models of scientific activity management in terms of world experience. These are primarily universities for which there is a positive relative increase in indicators of total R&D, the share of extra-budgetary funds in university income from R&D, and the share of income from R&D in total income. It has been established that the current stage of development of universities is characterized by the presence of both competitive advantages and challenges that form the features of their modernization. The response to the challenges should be the creation of a business model of the University 4.0 activity which includes new technologies, products and services that are in demand in the country.

Keywords: innovative regional development, innovative security, regional innovation ecosystem, national research universities, core universities

For citation: Maximova T. G., Bogdanova E. L., Brovka G. M. (2020) Study of Changing Role of Leading Universities in the National Innovation Ecosystem during Transition to the University 4.0 Model. *Science and Technique*. 19 (3), 258–266. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-258-266> (in Russian)

Введение

Необходимость решения задач развития инновационной активности, эффективной коммерциализации и внедрения научных разработок обоснована в стратегических документах развития экономики страны [1–4]. На ведущие высшие учебные заведения возлагаются задачи стать центрами региональных инновационных экосистем. В России с 2017 г. реализуется приоритетный проект «Вузы как центры пространства создания инноваций» [5], нацеленный на то, чтобы университеты стали активными участниками регионального социально-экономического и инновационного развития. В настоящее время 29 университетов имеют статус национальных исследовательских университетов (НИУ), поддержаны программы 33 опорных университетов в регионах [6, 7].

По данным Евростата [8], доля занятых исследованиями и разработками в секторе высшего образования составляет: в Евросоюзе – около 32 %, в Японии – 24, в России – 15 %. Доля сектора высшего образования в суммарных внутренних затратах на исследования и

разработки: в странах Евросоюза – более 23 %, в Японии – 12, в России – около 10 %.

В ряде публикаций [9–13], посвященных анализу влияния университетов на региональное инновационное развитие, делается вывод о том, что это влияние часто преувеличивают и реальные результаты не соответствуют ожиданиям. Достаточно типичными в данной области являются работы [11–13]. Анализ приведенных публикаций показывает, насколько важно при планировании региональных стратегий инновационного развития определять приоритеты университетов и сохранять баланс между образовательной, научной и предпринимательской деятельностью.

Цель исследования состояла в выявлении статистических закономерностей деятельности российских университетов в национальной инновационной экосистеме.

Материалы и методы исследования

С целью количественной характеристики, а также выявления общих и специфических черт моделей развития НИУ проанализированы основные показатели результативности их инно-

вационной и научно-исследовательской деятельности, состояние инновационной инфраструктуры. Используются данные за 2017 и 2018 гг. ежегодного мониторинга эффективности деятельности образовательных организаций высшего образования, проводимого Минобрнауки России [14]. Проанализированы показатели 2017–2018 гг. для 26 НИУ. Из статистического анализа исключены Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова и Санкт-Петербургский академический университет РАН в связи со спецификой их деятельности, Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского – в связи со статистическим выбросом по количеству международных инвестиционных позиций. Для анализа статистических показателей использованы методы описательной и многомерной статистики.

Результативность деятельности научно-исследовательских университетов как центров создания инноваций

Основное внимание при анализе результативности научной и инновационной деятельности НИУ уделено финансовым показателям. В [10] проведен анализ результативности деятельности НИУ по данным за 2017 г. В этом исследовании выполнено сравнение показателей деятельности за 2018 и 2017 гг., проверена

устойчивость закономерностей, выявленных по данным за 2017 г., в 2018-м г.

По данным 2017 г. [14] определена зависимость удельного веса доходов от научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР) в общем объеме доходов вуза (y) от общего объема НИОКР в денежном выражении (x) [10]. Эта зависимость, называемая кривой Энгеля, сохранилась и в 2018 г. (рис. 1). Она отражает постоянную эластичность удельного веса доходов от НИОКР по их объему в денежном выражении (в рассматриваемых диапазонах изменения показателей). То есть существует следующая закономерность: изменение объема НИОКР на 1 % приводит к изменению удельного веса доходов от них в общем объеме доходов вуза на 0,45–0,46 %.

В финансовом обеспечении научных исследований и разработок в НИУ выявлены следующие статистически значимые закономерности.

Доходы от НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника (НПР) возрастают при увеличении доли внебюджетных средств в доходах от НИОКР (рис. 2). Закономерность наблюдается для 2017 и 2018 гг., причем отмечается возрастание ожидаемых для заданной доли внебюджетных средств средних доходов НПР (линия регрессии на рис. 2 для 2018 г. выше линии регрессии для 2017 г.). Выявленные факты свидетельствуют о положительных тенденциях в осуществлении научной деятельности в НИУ.

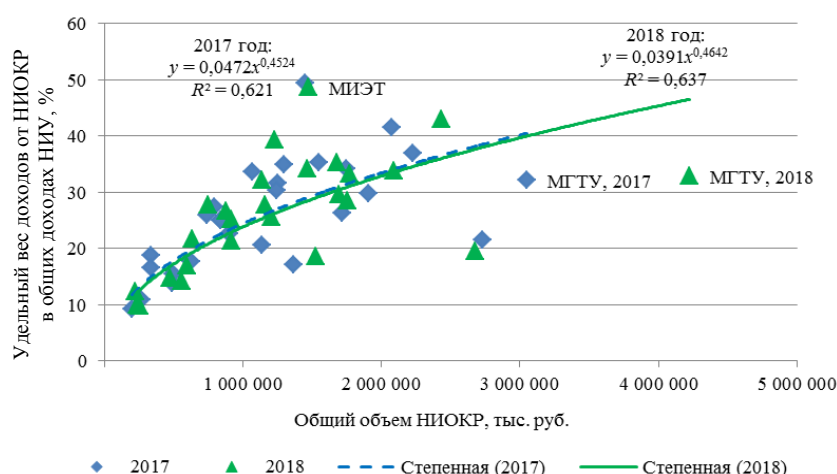


Рис. 1. Закономерности изменения удельного веса доходов от НИОКР в общих доходах национальных исследовательских университетов от общего объема НИОКР (построен авторами по данным [14])

Fig. 1. Patterns of change in the share of R&D income in the total income of national research universities of the total R&D (the graph constructed according to the data [14])

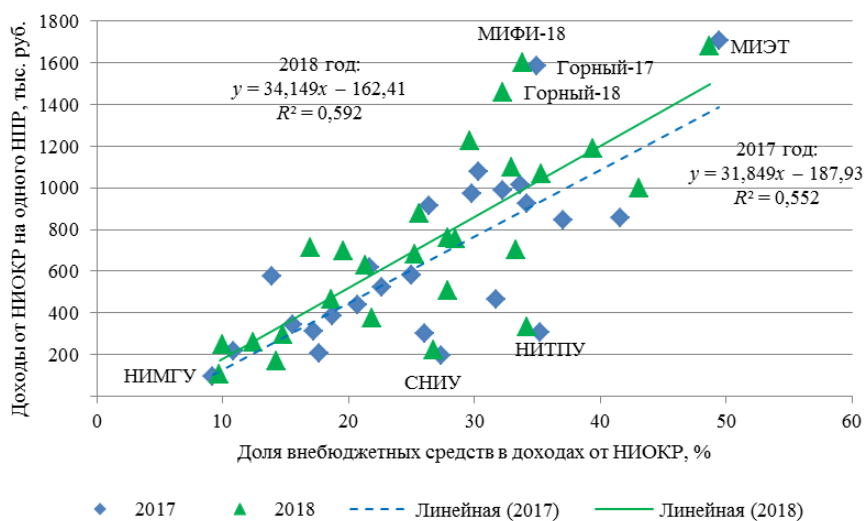


Рис. 2. Закономерности изменения доходов от НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника от доли внебюджетных средств в доходах от НИОКР (построен авторами по данным [14])

Fig. 2. Patterns of change in R&D income per one scientific and pedagogical worker from the share of extra-budgetary funds in R&D income (the graph constructed according to the data [14])

В [10] установлено, что в 2017 г. увеличение доли внебюджетных средств в доходах от НИОКР сопровождалось снижением общего объема НИОКР в денежном выражении. В 2018-м наблюдалось «выравнивание» показателя «Доля внебюджетных средств в общих доходах вуза от НИОКР»: его значение для НИУ в 2018 г. варьировалось в диапазоне 49–76 %, в то время как в 2017-м разброс составлял от 22 до 100 %. При этом разброс показателя «Общий объем НИОКР в денежном выражении» увеличился: в 2018 г. объем НИОКР составил от 222 до 4221 млн руб., а в 2017-м – от 203

до 3050 млн руб. (рис. 3). Указанный факт свидетельствует о повышении вовлеченности элементов инновационной экосистемы в финансирование научных исследований и разработок.

Отмечается постоянство показателей для НИУ «Высшая школа экономики», существенный рост общего объема НИОКР для МГТУ имени Н. Э. Баумана, университетов ИТМО, МФТИ. В то же время для Томского государственного университета и Университета «Горный» отмечается существенное снижение доли внебюджетных средств при сохранении общих объемов НИОКР (рис. 3).

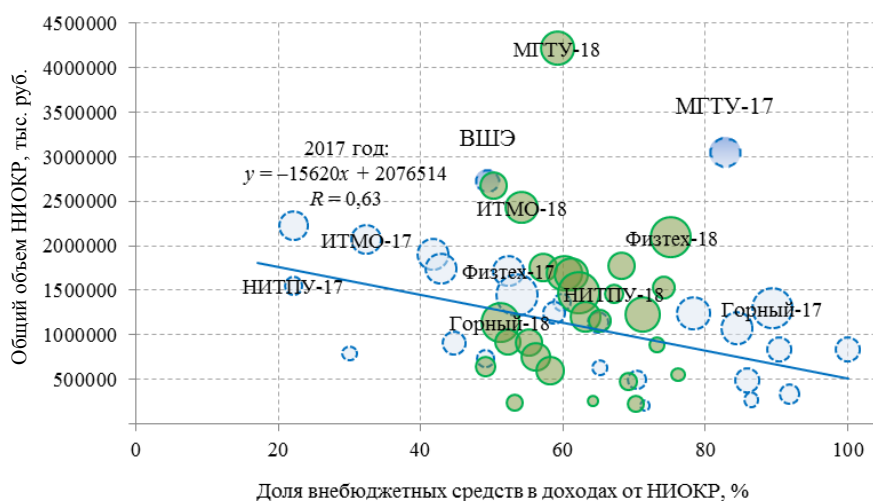


Рис. 3. Взаимосвязь между долей внебюджетных средств в доходах от НИОКР и общим объемом НИОКР

Fig. 3. Relationship between the share of extra-budgetary funds in R&D revenues and the total amount of R&D

Анализ изменений рассмотренных (проанализированных) показателей позволяет выделить НИУ, реализующие наиболее перспективные, с точки зрения мирового опыта, модели управления научной деятельностью. Это, в первую очередь, университеты, в которых есть положительный относительный прирост показателей общего объема НИОКР, доли внебюджет-

ных средств в доходах вузов от НИОКР, удельного веса доходов от НИОКР в общих доходах (рис. 4, 5, правый верхний квадрант). Для периода 2017–2018 гг. отмечается линейная взаимосвязь между относительным приростом удельного веса доходов от НИОКР в общих доходах вузов и относительным приростом общего объема НИОКР (рис. 5).

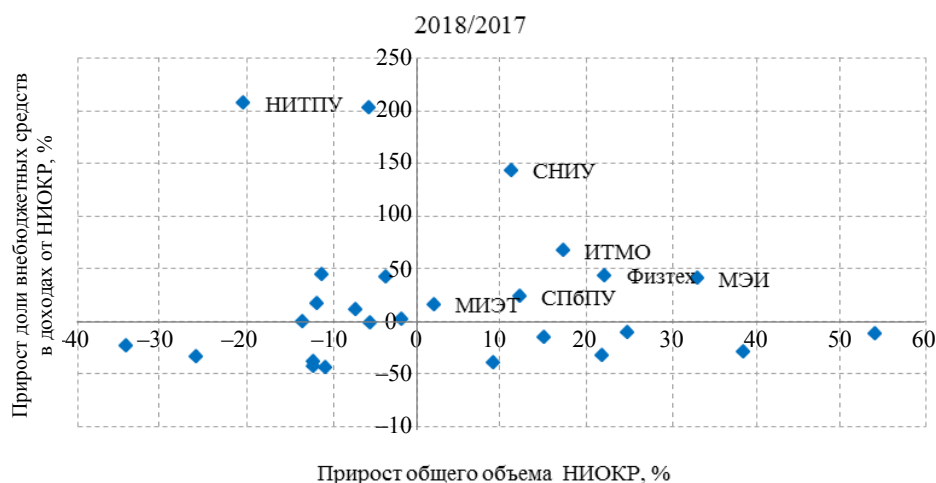


Рис. 4. Взаимосвязь между относительным приростом доли внебюджетных средств в доходах вузов от НИОКР и относительным приростом общего объема НИОКР за 2017–2018 гг. (по данным [14])

Fig. 4. Relationship between relative increase in the share of extra-budgetary funds in university income from R&D and relative increase in total R&D for 2017–2018 (according to [14])

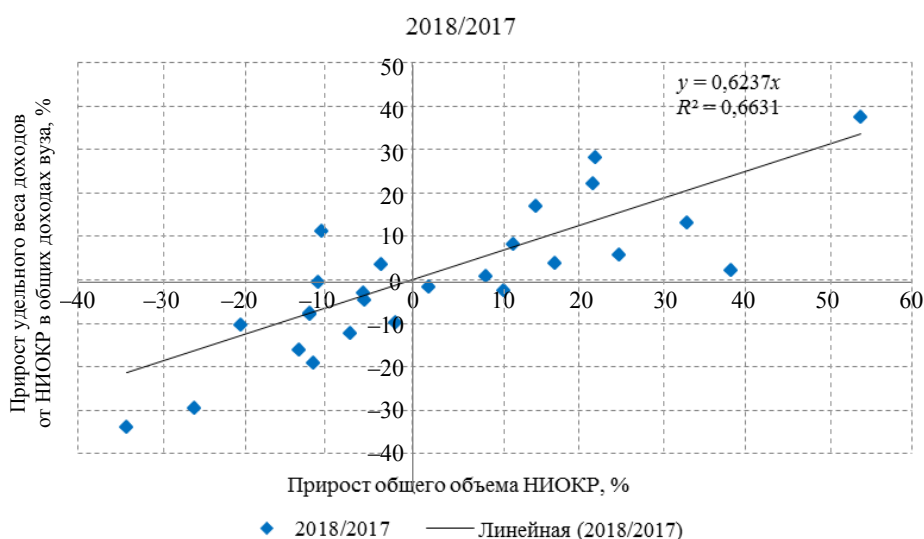


Рис. 5. Взаимосвязь между относительным приростом удельного веса доходов от НИОКР в общих доходах вузов и относительным приростом общего объема НИОКР за 2017–2018 гг. (по данным [14])

Fig. 5. Relationship between relative increase in the share of R&D income in total university incomes and relative increase in total R&D for 2017–2018 (according to [14])

Подход к построению типологии моделей развития НИУ, аналогичный излагаемому в [15], представлен нами в [10]. По данным 2017 г. с использованием метода факторного и кластерного анализа выявлены девять университетов, для которых типичны средние уровни предпринимательской инновационной активности и бюджетно-ориентированной научной деятельности, а также высокая практико-ориентированная научная активность [10]. Состав выделенной типологии остается прежним и для данных 2018 г.

Концептуальная модель «Университет 4.0»

В перспективе национальные исследовательские университеты, реализующие сегодня в той или иной степени модель развития «Университет 3.0», ориентированы на то, чтобы стать инновационными центрами в составе национальной инновационной экосистемы, обеспечивающими аккумуляцию знаний, трансфер технологий, формирование креативной среды, и тем самым перейти к следующему этапу развития – к модели «Университет 4.0». Бизнес-модель «Университет 4.0» включает в себя четыре признака:

1) возможность сочетания форм и режимов обучения: классическое образование и бизнес-образование; офлайн-, смешанные или полностью онлайн-курсы;

2) короткие циклы обновления квалификации, которые быстро реагируют на изменения в экономике и меняются с изменяющимися потребностями рынка труда;

3) управление карьерой после выпуска студентов, предложение постдипломных кратких курсов для дополнения портфеля навыков, создания новых навыков в зависимости от потребностей экономики и государства;

4) совместное развитие в сотрудничестве с реальным сектором экономики, развитие в качестве брокеров отношений между студентами и выпускниками и их потенциальными наставниками, работодателями и спонсорами.

Наиболее значимыми, с точки зрения влияния на развитие университета, внешними вызовами являются:

- формирование цифровой экономики, предполагающей универсальность компетенций;

- демографический тренд, объективно приводящий к росту доли обучаемых по коротким программам дополнительного и бизнес-образования;

- обеспечение конкурентоспособности национальной продукции на мировых рынках, следствием чего является активизация спроса на международную компоненту программ;

- новые внешние угрозы национальной безопасности и усиление их взаимосвязи с сохранностью интеллектуального потенциала стран, вызовы инновационной безопасности – состоянию защищенности национальных интересов государства от внутренних и внешних угроз, возникающих в условиях инновационного развития [16], что диктует необходимость интеграции предметной области «интеллектуальная собственность» во все иные предметные области и сферы деятельности;

- тяжелое административно-правовое обременение деятельности образовательных учреждений, что снижает гибкость и скорость реагирования на вызовы.

Данные вызовы предполагают следующие необходимые изменения в организации образовательной, научной, проектно-социальной и предпринимательской деятельности университета:

- переход от образовательного цикла к спирали развития на программах высшего образования – дополнение их программами, ориентированными на ускоренное обновление знаний;

- изменение форм и инструментов организации обучения, резкое увеличение доли научно-технической информации в структуре знаний;

- возрастание требований к уровню квалификации работников;

- возрастание роли международных профессиональных и образовательных стандартов.

Факторами устойчивого развития университета являются:

- переход от поиска и использования ресурсов к поиску и использованию драйверов будущего развития и инструментов управления ими; диверсификация как принцип деятельности, множественность продуктов и ресурсов;

системность и взаимообусловленность всех видов деятельности;

- переход от работы с абитуриентами к поиску талантов, возвращение и работа с ними; ускоренная подготовка профессионалов для формирующихся рынков в тактической перспективе;

- индустриальные связи с бизнес-сообществом, целеполагающая система коммуникаций, интеграционная модель сотрудничества;

- инновационная инфраструктура высокой мобильности (предакселераторы и акселераторы, центры поддержки технологий и инноваций и пр.);

- значительный потенциал в ряде областей прикладных научных исследований (внешне-экономическая деятельность, интеллектуальная собственность).

Факторы, негативно влияющие на развитие университета:

- малые темпы профессиональной мобильности в части языковой подготовки преподавателей;

- отсутствие механизмов контроля над обеспечением внутренних стимулов достижения и поддержки международного уровня качества учебных программ;

- слабая дифференциация научных исследований и аналитических разработок, слабое взаимодействие студенческих исследований и разработок с реальным сектором экономики;

- слабая материально-техническая база.

При сохраняющемся потенциале и конкурентных преимуществах негативные факторы создают риски деятельности университета и в условиях ограничений других возможностей развития могут стать существенным барьером, препятствующим эффективному развитию.

ВЫВОДЫ

1. При увеличении доли внебюджетных средств в доходах от НИОКР возрастают доходы от НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника НИУ. Установленная закономерность наблюдалась для 2017 и 2018 гг., причем отмечается возрастание ожидаемых для заданной доли внебюджетных средств средних доходов НПП. Выявленные факты сви-

детельствуют о положительных тенденциях в осуществлении научной деятельности в НИУ.

2. В 2018 г. наблюдалось «выравнивание» значений показателя «Доля внебюджетных средств в общих доходах НИУ от НИОКР» по сравнению с 2017 г. Выравнивание значений показателя свидетельствует о повышении вовлеченности элементов инновационной экосистемы в финансирование научных исследований и разработок в большинстве НИУ.

3. Анализ изменений проанализированных показателей позволяет выделить НИУ, реализующие наиболее перспективные, с точки зрения мирового опыта, модели управления научной деятельностью. Это, в первую очередь, университеты, для которых отмечается положительный относительный прирост показателей общего объема НИОКР, доли внебюджетных средств в доходах вузов от НИОКР, удельного веса доходов от НИОКР в общих доходах.

4. Современный этап развития университетов характеризуется наличием как конкурентных преимуществ, так и вызовов, формирующих особенности его развития. Реакцией на вызовы должно стать создание бизнес-модели деятельности «Университета 4.0», включающей новые технологии, продукты и услуги, востребованные в стране.

5. В структуре и функциях современных национальных исследовательских университетов присутствуют отличительные признаки модели «Университет 4.0». Это, прежде всего, собственная инновационная экосистема, основывающаяся на сетевом взаимодействии с корпоративными партнерами, развитой ресурсной базе, апробированных механизмах внедрения инновационных разработок.

6. «Университет 4.0» – полигон для формирования нового образования и направлений исследований, новых технологических и бизнес-компетенций, предпринимательской и цифровой культуры. Это – центр быстрых изменений и возможность индуцировать влияние университета на развитие региона и конкретных отраслей экономики. Это один из основополагающих элементов обеспечения инновационной безопасности государства.

Сокращения:

ВШЭ – Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»;

«Горный» – Санкт-Петербургский горный университет;

ИТМО – Национальный исследовательский университет ИТМО;

МГТУ – Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана;

МИФИ – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;

МИЭТ – Национальный исследовательский университет «МИЭТ»;

МЭИ – Национальный исследовательский университет «МЭИ»;

НИТПУ – Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

СНИУ – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева;

СПБПУ – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

МФТИ (Физтех) – Национальный исследовательский университет МФТИ.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации на развитие гражданского общества № 19-1-018506.

ЛИТЕРАТУРА

1. Послание Президента Российской Федерации Федеральному Собранию от 01.12.2016 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/53379>.
2. О системе управления реализацией программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (вместе с «Правилами разработки, мониторинга и контроля выполнения планов мероприятий по реализации программы «Цифровая экономика Российской Федерации»): постановление Правительства Российской Федерации от 28.08.2017 № 1030 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_223702/.
3. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года. Минэкономразвития [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://economy.gov.ru/mines/activity/sections/innovations/doc20120210_04.
4. О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы: Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216363.
5. Паспорт приоритетного проекта «Вузы как центры пространства создания инноваций»: утвержден Президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам, протокол от 25 октября 2016 г. № 9 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/OnTUmegFLNj5Uqtac57y1WG1EtMG9ABe.pdf>.
6. Новости Министерства образования и науки Российской Федерации от 15.12.2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minobrnauki.rf/m/news/11800>.
7. Опорные университеты России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.flagshipuniversity.ntf.ru>.
8. Intramural R&D Expenditure (GERD) by Sectors of Performance and Source of Funds // European Commission/Eurostat/Data/Database [Electronic resource]. Access mode: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=rd_e_gerdfund&lang=en.
9. Кулишова, А. В. Анализ показателей инновационных экосистем стран мирового лидерства / А. В. Кулишова // Экономика. Право. Инновации. 2019. № 2. С. 56–63.
10. Максимова, Т. Г. Исследовательские университеты в структуре национальной инновационной экосистемы / Т. Г. Максимова, А. С. Николаев, Д. Бямбацогт // Теория и практика общественного развития. 2018. Т. 126, № 8. С. 81–87.
11. Kempton, L. Wishful Thinking? Towards a More Realistic Role for Universities in Regional Innovation Policy / L. Kempton // European Planning Studies. 2019. Vol. 27, No 11. P. 2248–2265. DOI: 10.1080/09654313.2019.1628183.
12. Tripl, M. The Role of Universities in Regional Development: Conceptual Models and Policy Institutions in the UK / M. Tripl, T. Sinozic, H. L. Smith // Sweden and Austria, European Planning Studies. 2015. Vol. 23, No 9. P. 1722–1740. DOI: 10.1080/09654313.2015.1052782.
13. Brown, R. Mission Impossible? Entrepreneurial Universities and Peripheral Regional Innovation Systems / R. Brown // Industry and Innovation. 2016. Vol. 23, No 2. P. 189–205. DOI: 10.1080/13662716.2016.1145575.
14. Информационно-аналитические материалы по результатам проведения мониторинга эффективности деятельности образовательных организаций высшего образования. Минобрнауки, ГИВЦ, 2018, 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://indicators.mic.edu.ru/monitoring/?m=vpo>.
15. Верзилин, Д. Н. Обоснование стратегических ориентиров для разработки и реализации государственной политики в сфере физической культуры и спорта / Д. Н. Верзилин, Э. И. Горовых // Теория и практика общественного развития. 2018. Т. 127, № 9. С. 49–55.
16. Бровка, Г. М. Инновационное развитие и национальная безопасность / Г. М. Бровка. Минск: РИВШ, 2017. С. 280.

Поступила 17.03.2020

Подписана в печать 12.05.2020

Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. *Address of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly dated 01.12.2016*. Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/53379> (in Russian).
2. *On the System for Managing the Implementation of the "Digital Economy of the Russian Federation" Program (Together with the Rules for the Development, Monitoring and Control of Implementation of Action Plans for the Implementation of the Program "Digital Economy of the Russian Federation")*: Decree of the Government of the Russian Federation of 28.08.2017 No 1030. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_223702/ (in Russian).
3. *Strategy of Innovative Development of the Russian Federation for the Period Until 2020*. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. Available at: http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/doc20120210_04 (in Russian).
4. *On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017–2030*: Decree of the President of the Russian Federation of 09.05.2017 No 203. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216363 (in Russian).
5. *Passport of the Priority Project "Universities as Centers of the Space for Creating Innovation"*: Approved by the Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and Priority Projects, Minutes of 25 October, 2016 No 9. Available at: <http://static.government.ru/media/files/OnTUmegFLNj5Uqtac57y1WG1EtMG9ABe.pdf> (in Russian).
6. *News of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation Dated 15.12.2017*. Available at: <https://minobrnauki.rf/m/news/11800> (in Russian).
7. *Supporting Universities in Russia*. Available at: <http://www.flagshipuniversity.ntf.ru> (in Russian).
8. *Intramural R&D Expenditure (GERD) by Sectors of Performance and Source of Funds*. Eurostat. Available at: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=rd_e_gerdfund&lang=en.
9. Kulishova A. V. (2019) Analysis of Innovative Ecosystem Indicators in the Countries of World Leadership. *Ekonomika. Pravo. Innovatsii* [Economics. Law. Innovation], (2), 56–63 (in Russian).
10. Maximova T. G., Nikolaev A. S., Byambatsogt D. (2018) Research Universities in the Structure of the National Innovation Ecosystem. *Teoriya i Praktika Obshchestvennogo Razvitiya = Theory and Practice of Social Development*, 126 (8), 81–87 (in Russian).
11. Kempton L. (2019) Wishful Thinking? Towards a More Realistic Role for Universities in Regional Innovation Policy. *European Planning Studies*, 27 (11), 2248–2265. <https://doi.org/10.1080/09654313.2019.1628183>.
12. Tripl M., Sinozic T., Smith H. L. (2015) The Role of Universities in Regional Development: Conceptual Models and Policy Institutions in the UK. *Sweden and Austria, European Planning Studies*, 23 (9), 1722–1740. <https://doi.org/10.1080/09654313.2015.1052782>.
13. Brown R. (2016) Mission Impossible? Entrepreneurial Universities and Peripheral Regional Innovation Systems. *Industry and Innovation*, 23 (2), 189–205. <https://doi.org/10.1080/13662716.2016.1145575>.
14. *Information and Analytical Materials on the Results of Monitoring the Effectiveness of Educational Institutions of Higher Education*. Available at: <http://indicators.miccedu.ru/monitoring/?m=vpo> (in Russian).
15. Verzilin D. N., Gorovykh E. I. (2018) Justification of Strategic Guidelines for the Development and Implementation of State Policy in the Field of Physical Education and Sports. *Teoriya i Praktika Obshchestvennogo Razvitiya = Theory and Practice of Social Development*, 127 (9), 49–55 (in Russian).
16. Brovka G. M. (2017) *Innovative Development and National Security*. Minsk, Publishing House of National Institute for Higher Education. 280 (in Russian).

Received: 17.03.2020

Accepted: 12.05.2020

Published online: 29.05.2020